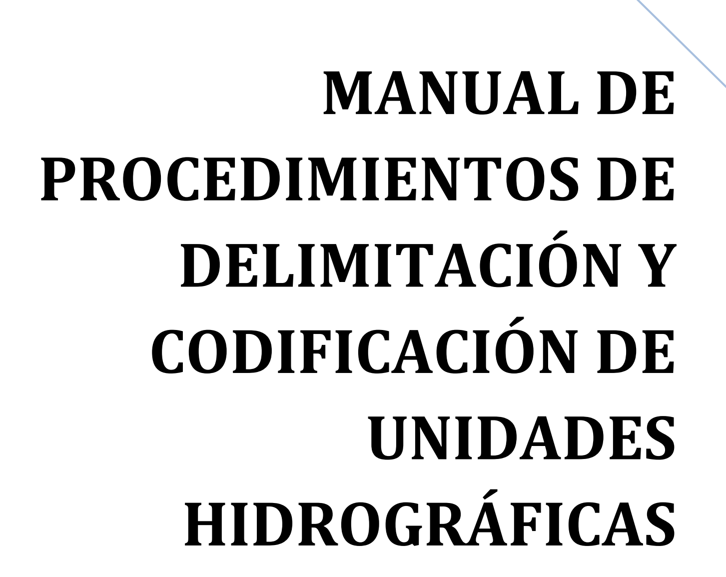


MANUAL DE PROCEDIMIENTOS DE DELIMITACIÓN Y CODIFICACIÓN DE UNIDADES HIDROGRÁFICAS

CASO : AMÉRICA DEL SUR

El manual, alcanza las pautas técnicas de un sistema semiautomático para delimitar y codificar las unidades hidrográficas de América del Sur aplicando la metodología Pfafstetter.

UICN SUR
[2008]

Rosa Ruiz
Humberto Torres

CONTENIDO

PRESENTACIÓN

El presente manual expone las pautas técnicas de la Delimitación y Codificación de las Unidades Hidrográficas de Sudamérica, utilizando técnicas de análisis espacial raster para la delimitación y el método Pfafstetter para la división y codificación de estas unidades hidrográficas.

Este manual hace referencia a los antecedentes de la aplicación de esta metodología en América y su importancia en estudios de gran alcance; su conocimiento permitirá simplificar los criterios en cuanto a la división de unidades hidrográficas.

Describe la generación automática de las unidades hidrográficas con la utilización de los sistemas de información geográfica (SIG), desde modelos digitales de elevación (MDE), redes de drenaje hasta la obtención de los watersheds o cuencas.

Las unidades hidrográficas que se obtienen tienen la particularidad, que en la medida que se generan se van aplicando los criterios del método Pfafstetter, ello implica un proceso, que va desde la determinación del río principal, selección de las cuatro redes de drenaje de mayor tamaño *-por cálculos de acumulación de flujo-* hasta la generación de las cuencas (watersheds) en formato raster *-utilizando el stream link y la dirección de flujo-*. Posteriormente el raster se convierte en vector, y luego de un proceso de suavizado *-smooth* - queda expedito para la codificación tabular.

Las unidades hidrográficas (que para el método de Pfafstetter son de tres tipos: cuencas, intercuencas y cuencas internas o cerradas) menores divididas se codifican según el orden de jerarquía en el que se encuentren.

1. ANTECEDENTES

El presente Manual de procedimientos de delimitación y codificación de unidades hidrográficas está basado de manera fundamental en el "Manual de Procedimientos de Delimitación y Codificación de Cuencas Hidrográficas del Perú" realizado por el Instituto Nacional de Recursos Naturales –INRENA- en el 2003.

El método de codificación de unidades hidrográficas que se describe en el presente Manual fue creado en Brasil por Otto Pfafstetter en 1989 y difundido a partir de 1997 por Kristine Verdin a través del Servicio Geológico, de los Estados Unidos (USGS) en el Programa Nacional del Medio Ambiente de las Naciones Unidas. En la actualidad va constituyéndose en un estándar de codificación de unidades hidrográficas.

En la actualidad, con el avance científico y tecnológico (informática y de los sistemas de información geográfica) es posible representar digitalmente la superficie de la tierra a través de una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua, cuando la variable a representar es la cota o altura del terreno se denomina Modelo Digital de Elevación (MDE), estos grandes aportes ayudan en las diferentes aplicaciones del estudio de la tierra; siendo asimismo fundamental para delimitar las cuencas de una manera automática.

Uno de los aportes más importantes en el desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica constituye el proyecto HydroSheds (www.worldwildlife.org/hydrosheds), proyecto que construyó la base digital raster hidrográfica de Sudamérica, la cual ha servido de información de base para el presente trabajo; el proyecto asimismo está elaborando productos para investigaciones científicas la geología, glaciología e hidrología. Estos productos devienen de las imágenes de radar tomadas en el año 2000 por la NASA – EEUU en el proyecto topográfico de radar (SRTM), con el uso del Transbordador Endeavour, cuyas tomas de radar están proporcionando datos de elevación del terreno de una alta calidad.

2. SISTEMA DE CODIFICACIÓN PFAFSTETTER

Es una metodología para asignar Identificadores (Ids) a unidades de drenaje basado en la topología de la superficie o área del terreno; asigna Ids a una unidad hidrográfica para relacionarla con las unidades hidrográficas que contiene y de las unidades hidrográficas con las que limita. (Ver fig.2.1)

2.1 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES

- El sistema es jerárquico y las unidades son delimitadas desde las uniones de los ríos (punto de confluencia de ríos) o desde el punto de desembocadura de un sistema de drenaje en el océano.

- A cada unidad hidrográfica se le asigna un código numérico, basado en su ubicación dentro del sistema de drenaje, de tal forma que éste código es único en todo el continente.

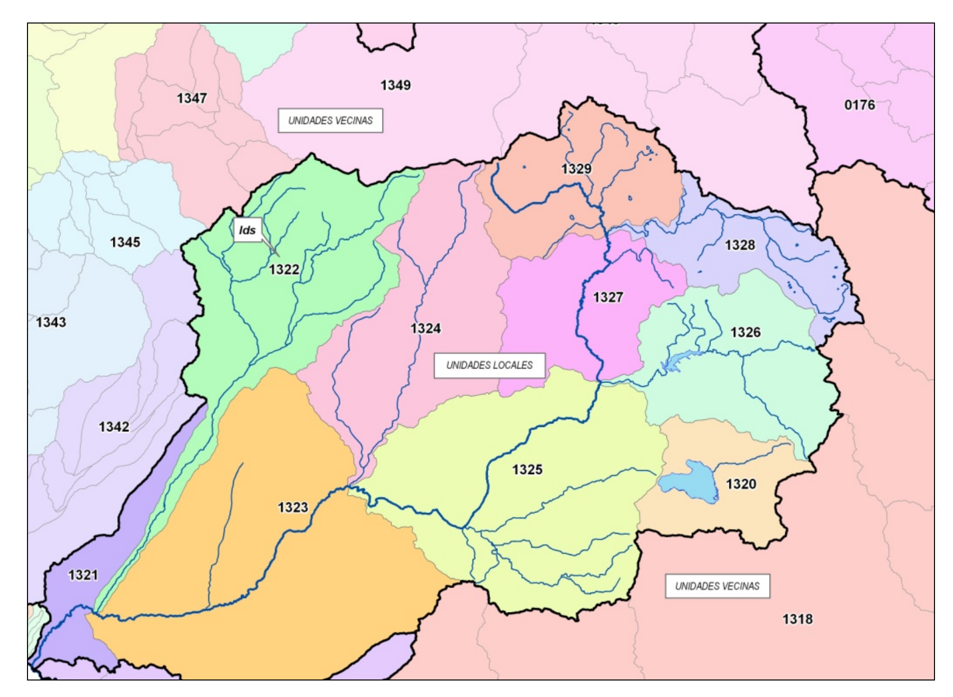


Figura N° 2.1

- Este método hace un uso mínimo de dígitos en los códigos, tal es así que el número de dígitos del código representa a su vez el nivel de la unidad hidrográfica codificada.

- La distinción entre río principal y tributario, es en función del área de drenaje. Así, en cualquier confluencia, el río principal será siempre aquel que posee el mayor área drenada entre ambos. (Ver fig. 2.2).

- El código de la unidad hidrográfica provee información importante tales como el tipo de unidad de drenaje, nivel de codificación y ubicación al interior de la unidad que lo contiene.

2.2 TIPOS DE UNIDADES HIDROGRÁFICAS

El Sistema de delimitación y codificación de Pfafstetter considera tres tipos de unidades de drenaje: cuencas, intercuencas y cuencas internas.

2.2.1 Cuenca**,** es un área (unidad hidrográfica) que no recibe drenaje de ninguna otra área, pero si contribuye con flujo a otra unidad de drenaje.

2.2.2 Intercuenca, es un área (unidad de drenaje) que recibe el drenaje de otra unidad que se ubica aguas arriba, mediante el curso del río principal, y permite el drenaje del flujo propio y del que ha ingresado a esta unidad hacia la unidad

de drenaje que se ubica hacia aguas abajo. En tal sentido una unidad de drenaje tipo intercuenca es una unidad de drenaje o de tránsito del río principal al cual también aporta sus propios caudales.

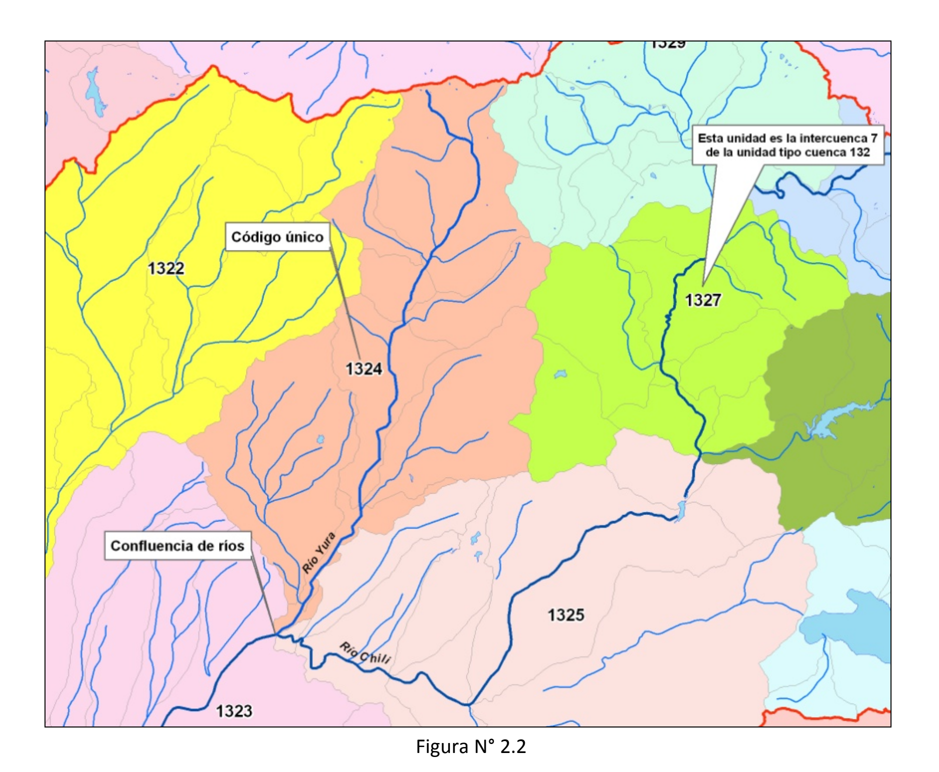


Figura N° 2.2

2.2.3 Cuenca Interna, es un área de drenaje que no recibe flujo de agua de otra unidad ni contribuye con flujo de agua a otra unidad de drenaje o cuerpo de agua. (Ver fig. 2.3)

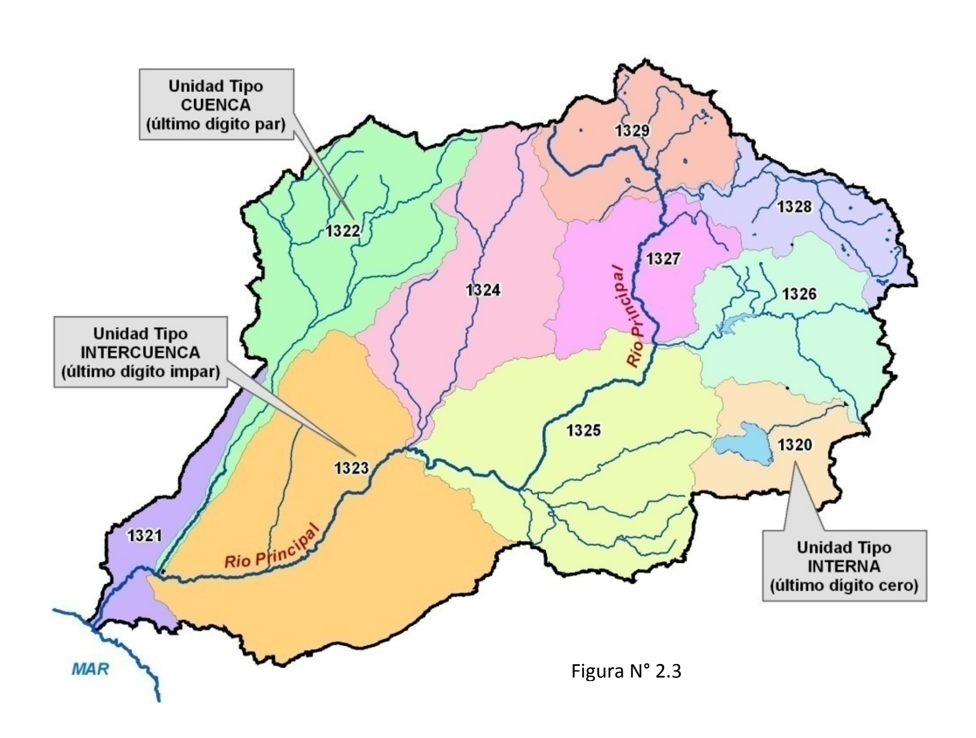


Figura N° 2.3

2.3 PROCESO DE CODIFICACIÓN

Para iniciar el proceso de codificación se debe en principio determinar el curso del río principal de la unidad que se va codificar. (Ver fig. 2.4).

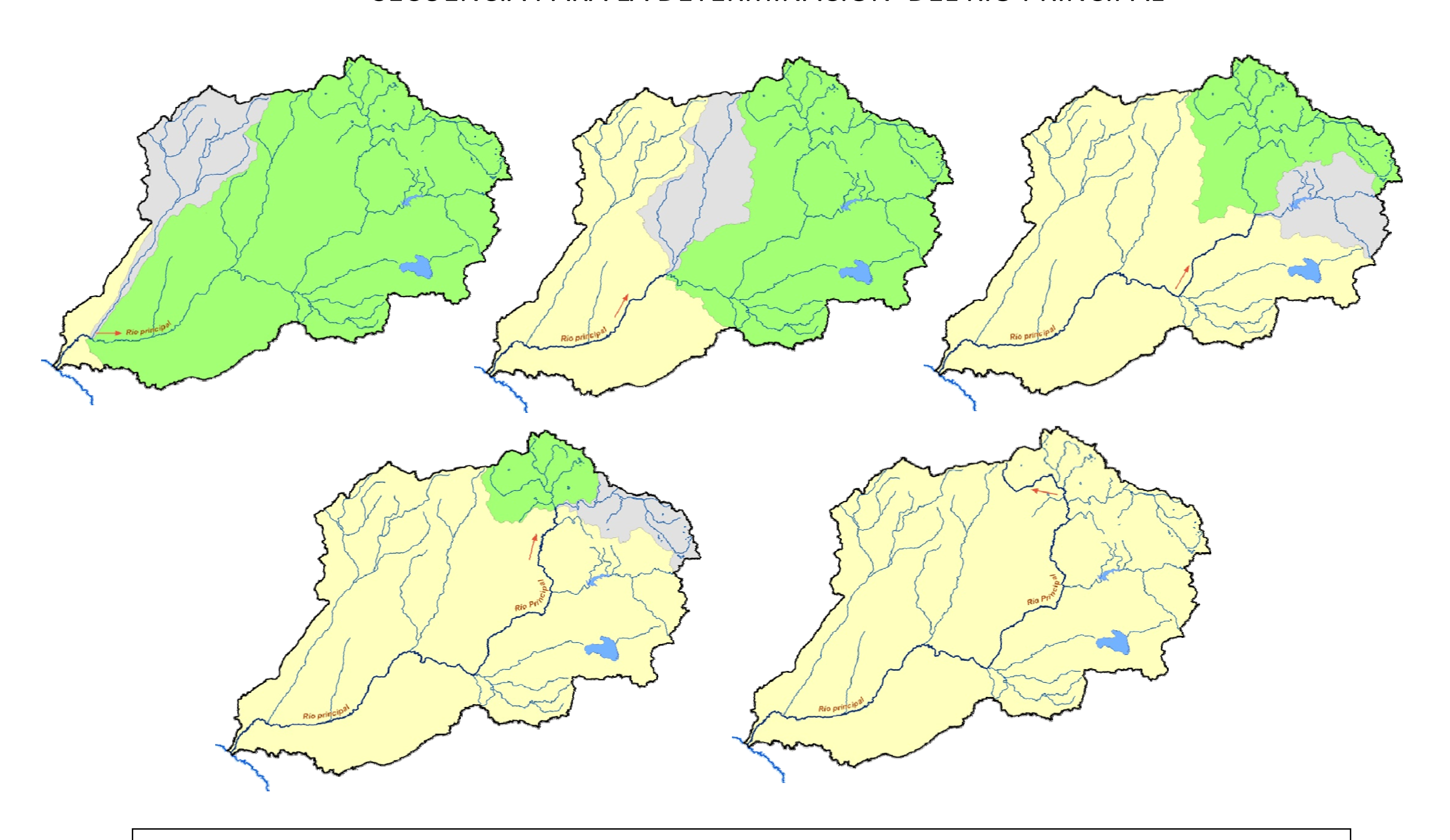
Una vez determinado el curso del río principal, se determinan las cuatro unidades hidrográficas de tipo cuenca, que son las cuatro unidades de mayor área que confluyen al río principal.

Las cuatro unidades tipo cuenca se codifican con los dígitos pares **2, 4, 6 y 8**, desde aguas abajo hacia aguas arriba; es decir, desde la desembocadura hacia la naciente del río principal. Las otras áreas de drenaje se agrupan en unidades hidrográficas de tipo intercuenca, y se codifican, también desde aguas abajo (desde la confluencia) hacia aguas arriba, con los dígitos impares **1, 3, 5, 7 y 9**.

Por la metodología de delimitación y codificación de las unidades hidrográficas, el código 9 siempre resulta o se reserva para la unidad de drenaje de mayor tamaño de la parte superior de la cuenca o cabecera de cuenca la misma que generalmente contiene el origen del río cuya unidad de drenaje se está codificando.

Cada una de las unidades de drenaje de tipo cuenca o intercuenca, delimitadas y codificadas en un determinado nivel (por ejemplo el primero) se pueden a su vez subdividir y codificar siguiendo exactamente el proceso antes descrito, de modo que por ejemplo la delimitación y codificación de la unidad de drenaje tipo cuenca de código **8** se subdivide y codifica en nueve unidades hidrográficas, cuatro de tipo cuenca códigos 82, 84, 86 y 88 y cuatro de tipo intercuenca de códigos 81, 83, 85 y 87 así como la unidad hidrográfica de cabecera de código 89. El mismo proceso se aplica a las unidades de tipo intercuenca, de modo que por ejemplo la unidad tipo intercuenca de código 3, se subdivide en las unidades de tipo cuenca de códigos 32, 34, 36 y 38 y en las unidades tipo intercuenca 31, 33, 35, 37 y 39. Los códigos de las unidades menores deben llevar siempre al inicio el código o los dígitos de la unidad que lo contiene. (Ver fig. 2.5).

SECUENCIA PARA LA DETERMINACIÓN DEL RÍO PRINCIPAL



En cualquier confluencia, el río principal será siempre aquel que va por la unidad de mayor área de drenaje

Figura N° 2.4

PROCESO DE DIVISIÓN Y CODIFICACIÓN

Los dígitos pares indican que son unidades tipo cuenca y los impares son de tipo intercuenca, exceptuando el número 0 que es tipo interna

TIPO CUENCA

TIPO INTERCUENCA

TIPO CUENCA INTERNA
(Criterio Incorporado)

Figura N° 2.5

2.4 PARTICULARIDADES DEL MÉTODO

- Una particularidad del método se presenta en la codificación de las dos unidades más altas de la unidad hidrográfica que se está codificando. En este caso a la unidad que presenta mayor área de drenaje se le asigna el código "9" y a la otra, el código "8" (Ver fig. 2.6). Esta particularidad del método permite identificar la cuenca donde se origina el río, que para el ejemplo corresponde al código 89.

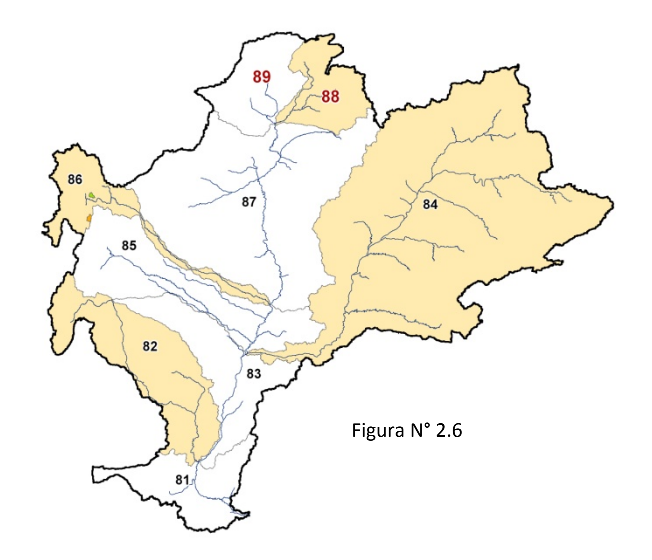


Figura N° 2.6

- Si una unidad hidrográfica contiene más de una unidad tipo cuenca interna o endorréica, se asigna el código "0" en el nivel que corresponda a la unidad de mayor tamaño y las otras unidades se incorporan a las unidades que lo contienen en el siguiente nivel. (Ver fig. 2.7)

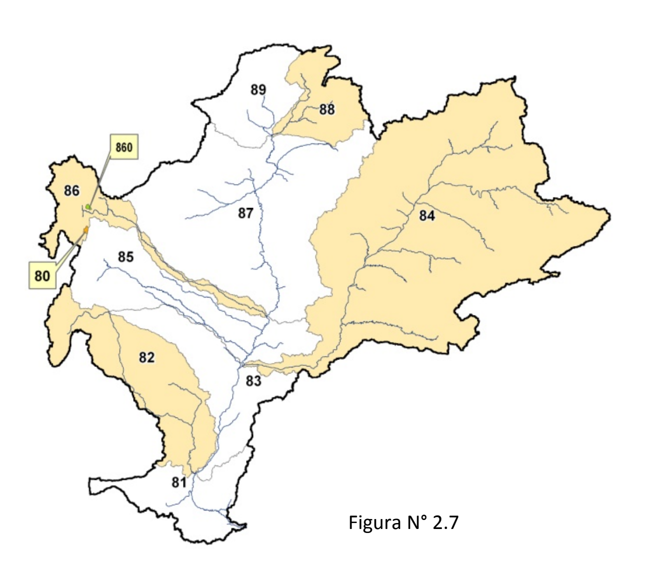


Figura N° 2.7

- **Para las regiones hidrográficas cuyas unidades drenan de forma paralela a los océanos**, el sistema de codificación de Pfafstetter determina que se identifique las cuatro unidades hidrográficas de mayor área de drenaje y luego la asignación de códigos se realiza considerando el sentido de las agujas del reloj, es decir las vertientes cuyas aguas desembocan en un mar oriental, serán codificadas de norte a sur; y las vertientes cuyas aguas desemboquen en un mar occidental, (como es el caso de la vertiente del Pacífico), serán codificadas de sur a norte. La subdivisión y codificación en los subsiguientes niveles se realizará siguiendo el mismo criterio. (Ver Fig. 2.8)

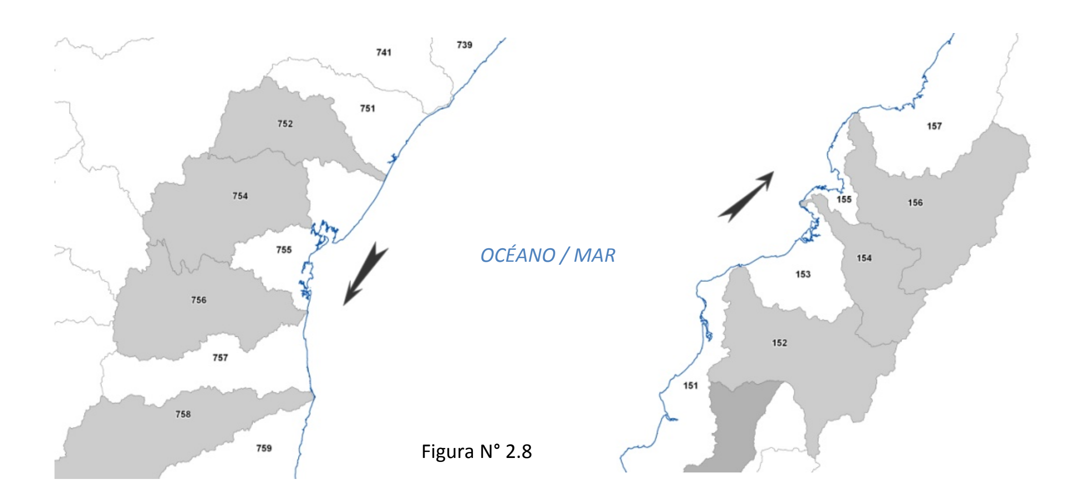


Figura N° 2.8

- **Cuencas internas cuya red de drenaje confluye en una laguna**, Es uno de los casos más comunes de unidades cerradas, en las cuales los ríos que descienden por sus laderas desembocan en la zona más baja de ésta conformando un lago o laguna. No es posible en este caso determinar un curso o río principal, en tal sentido se definen primero las cuatro unidades de mayor extensión que constituirán las cuencas, y luego las áreas de drenaje comprendidas entre las cuatro cuencas constituirán las unidades tipo intercuenca que también serán cuatro unidades; añadiéndose a las anteriores una novena unidad que será constituida por el mismo cuerpo de agua ubicado en la parte inferior. La codificación de las unidades es en sentido horario, iniciando por la cuenca que se encuentre más al nor-oeste, a la cual se le asignará el código 2. Ejemplo: (Ver Fig. 2.9)

- **Cuencas internas que poseen un colector principal**, son aquellas unidades cerradas donde si es posible distinguir un flujo principal, el cual puede encontrar a lo largo de su recorrido algunos lagos o lagunas, los mismos que serán considerados como parte de este.

Luego de definir el rio principal, se determinan las cuatro unidades hidrográficas de mayor extensión que constituirán las unidades tipo cuenca y las

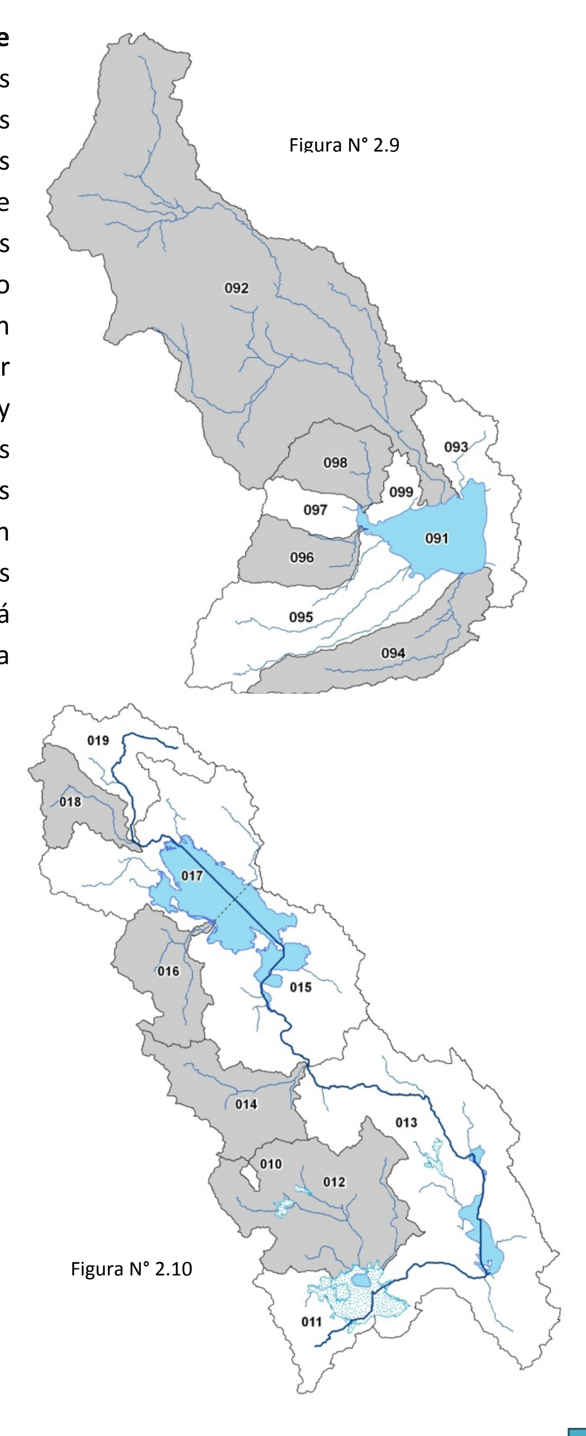


Figura N° 2.9

Figura N° 2.10

áreas de drenaje comprendidas entre la cuencas pasarán a constituir las cinco unidades de tipo intercuenca, cuya delimitación respectiva, de ser necesario, atravesarán los cuerpos de agua tipo laguna, considerados como parte del curso principal. La codificación se realizará, siguiendo el criterio establecido por el método desde la parte más baja hacia la más alta de la unidad de drenaje. Ejemplo: Sistema hidrográfico Titicaca – Poopó (Unidad Hidrográfica 01). (Ver Fig. 2.10)

- **Cuencas internas cuya red de drenaje confluye en un punto común, sin conformar necesariamente una laguna**. En este caso los ríos confluyen en un cuerpo de agua incipiente o inexistente, esto puede ser debido a que son cuerpos o espejos de agua temporales o en vías de extinción. (Ver fig. 2.11)

Para este caso, la información topográfica del Proyecto SRTM, es de mucha utilidad, pues al ser información captada por radar posee información del relieve aún debajo del agua, lo cual posibilita determinar unidades hidrográficas en esa zona.

Figura N° 2.11: Unidad Hidrográfica 08.

Debido a que todos los cursos confluyen en un punto común o en un área común de muy poca extensión, las unidades interiores que se forman son de tipo cuenca. La codificación, al igual que en el caso anterior, se realiza desde la unidad más al noroeste, siguiendo el sentido horario para la codificación del resto de las unidades; la unidad que se forme debajo del agua llevará el código 1.

- **Cuencas internas conformadas también por un conjunto de cuencas internas o cerradas**. Son unidades características de la Región Hidrográfica 0, y se presentan en la parte central de ésta región o unidad hidrográfica, conformando un grupo de unidades endorreicas independientes. La única manera de poder agruparlas en

unidades mayores es eligiendo las cumbres de mayor altitud que las circundan como límites. Serán consideradas las nueve de mayor tamaño.

La delimitación de unidades menores sigue el mismo procedimiento anterior, apoyándose de los valores de altitud de sus cumbres, se conformarán en lo posible nueve agrupaciones, considerándose las de mayor tamaño. La inspección de la morfología del terreno también es de mucha ayuda.
La codificación como en los casos anteriores, sigue el mismo sentido, pero esta vez, iniciándose con el código 1.

Ejemplo: Unidades Hidrográficas 02, 03, 04, 05, 06 y 07. (Ver fig. 2.12)

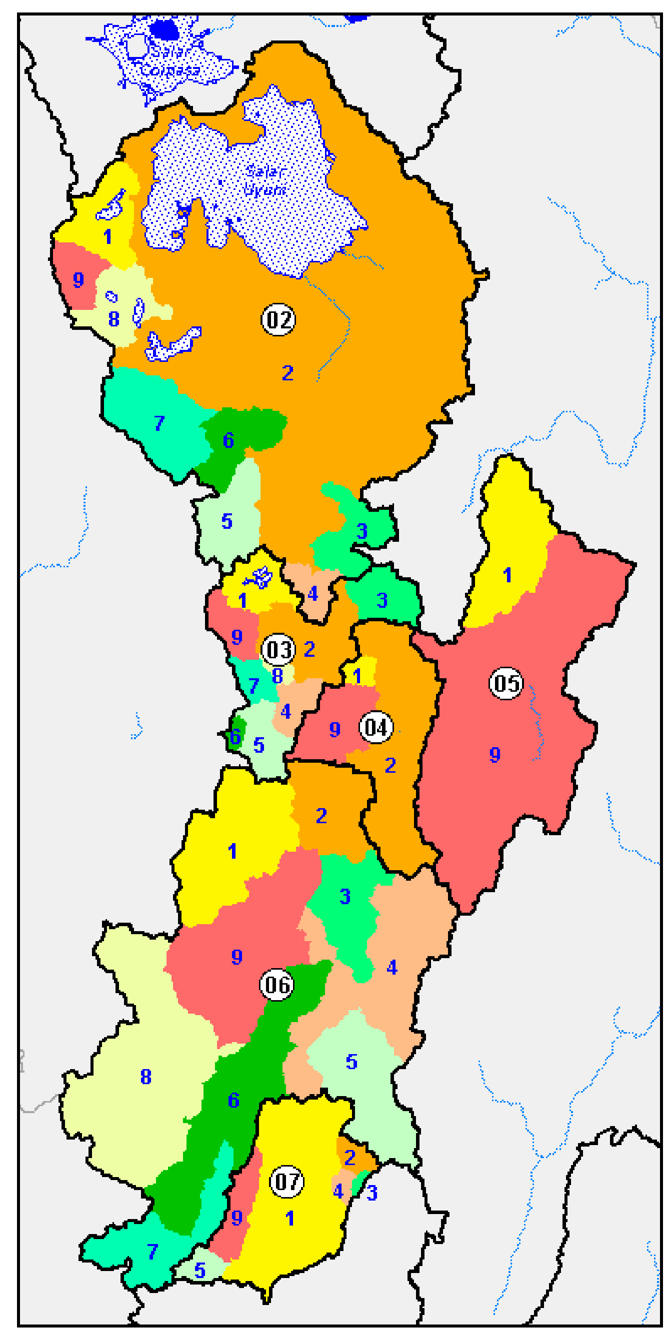
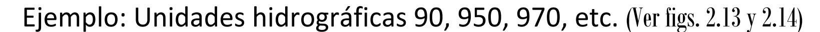


Figura N° 2.12. Unidades hidrográficas 02, 03, 04, 05, 06 y 07.

- **Unidades hidrográficas o Cuencas arreicas.** Son aquellas que presentan cursos de agua de bajo caudal, los cuales desaparecen durante su recorrido debido a filtración o evaporación, lo que permite la formación de unidades cerradas. Estas unidades, así formadas, seguirán el mismo procedimiento de codificación de cualquier unidad interna, cuyos casos o variantes de delimitación y codificación ya han sido descritas anteriormente.

La Región Hidrográfica 9 presenta muchos casos de unidades de drenaje arreico.


Ejemplo: Unidades hidrográficas 90, 950, 970, etc. (Ver figs. 2.13 y 2.14)

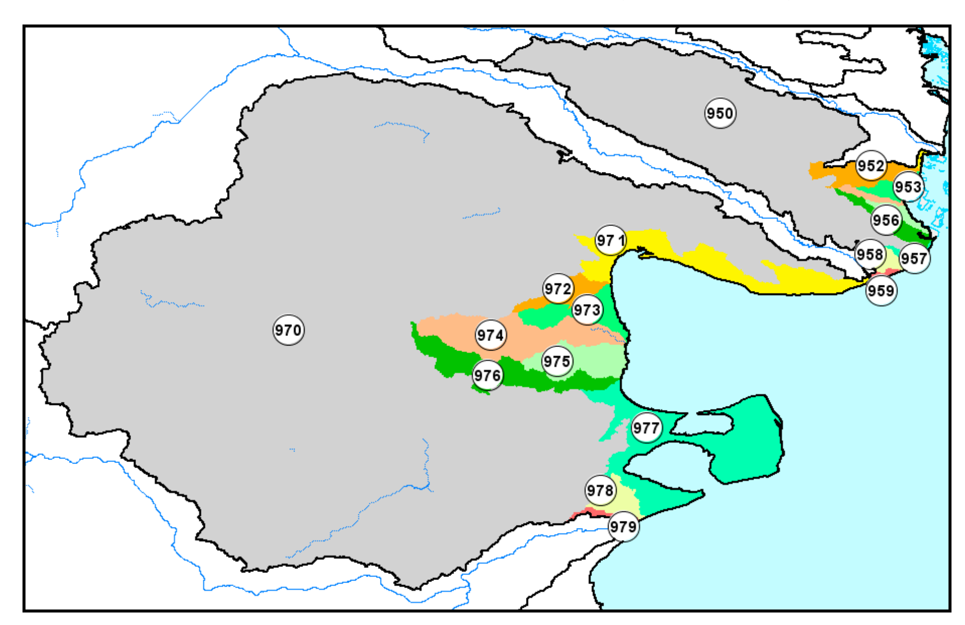


Figura N° 2.13. Unidades Hidrográficas 950 y 970 (gris), de tipo arreica. Obsérvese que dichas unidades no llegan tener acceso al mar.

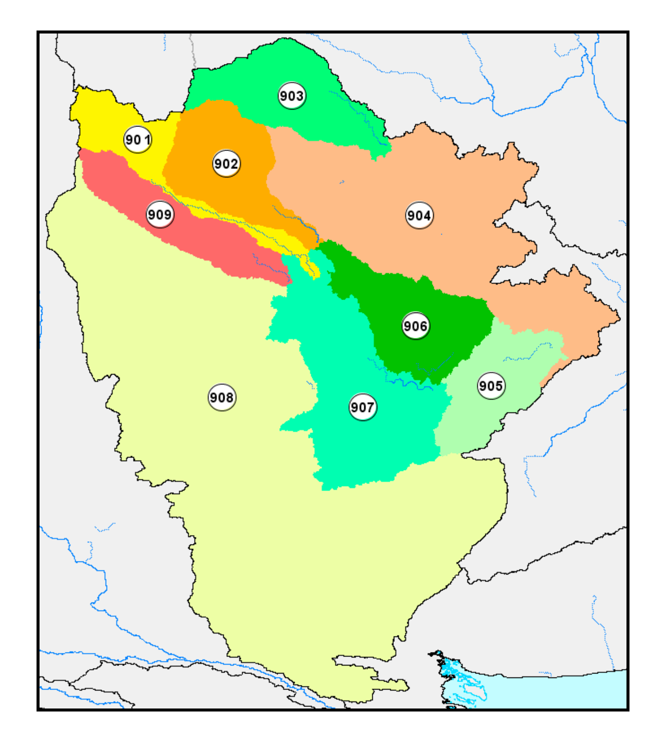


Figura N° 2.14. Unidad Hidrográfica 90 de tipo arreica. Obsérvese la subdivisión de ésta y el sentido horario de la codificación.

- **Islas.** Este es otro de los casos especiales. Estas porciones de territorio si se encuentran cercanas a la costa, serán consideradas para la codificación parte de de la unidad hidrográfica continental más cercana, asumiendo el código de ésta, en el nivel que se encuentre. (Ver fig. 2.16)

  En consecuencia, se debe considerar si las unidades hidrográficas tienen áreas de drenaje suficientemente extensas como para ser consideradas entre las cuatro unidades tipo cuenca.

  La Región Hidrográfica 9 posee un gran número de islas relacionadas a su ámbito, siendo las más notables.

  Ejemplo: La Unidad Hidrográfica 558 y 559. (Ver fig. 2.15)

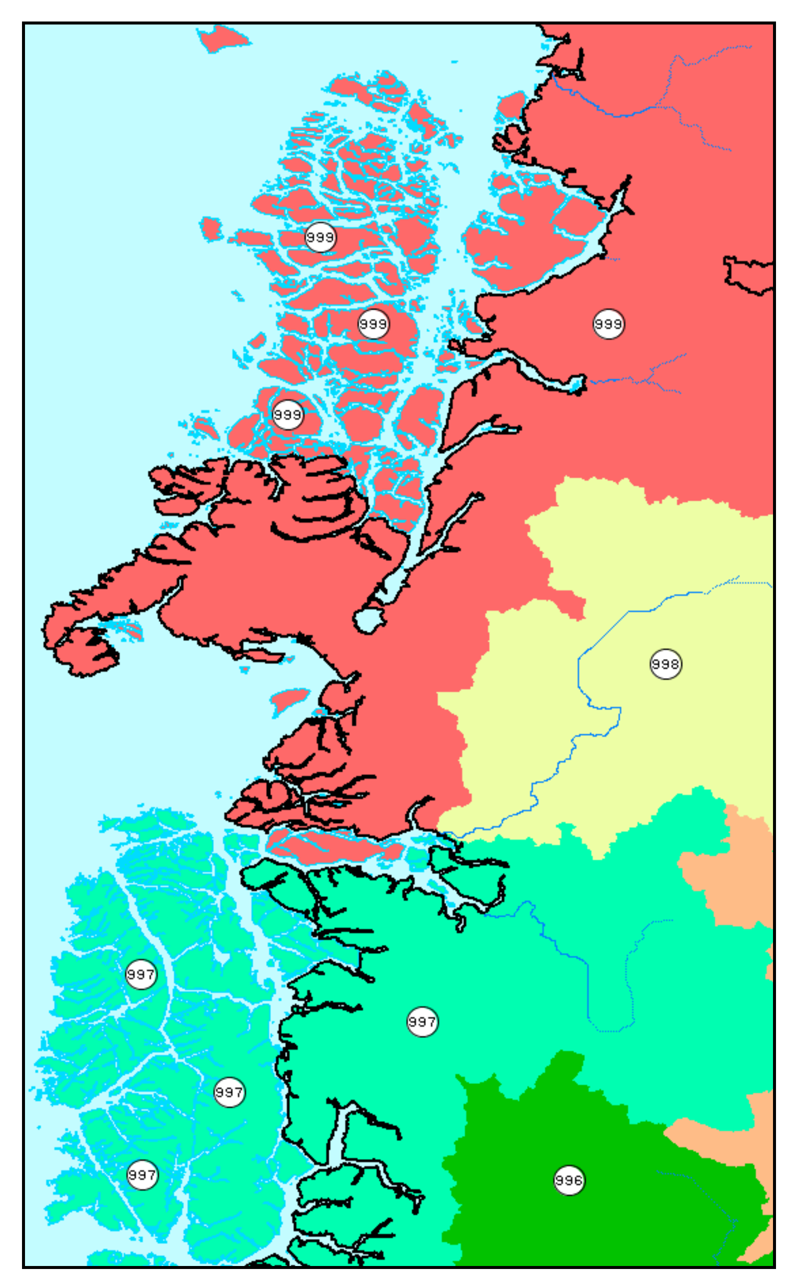


Figura N° 2.15: Unidades Hidrográficas 997 y 999. Obsérvese como las islas reciben el código de la unidad continental más cercana.

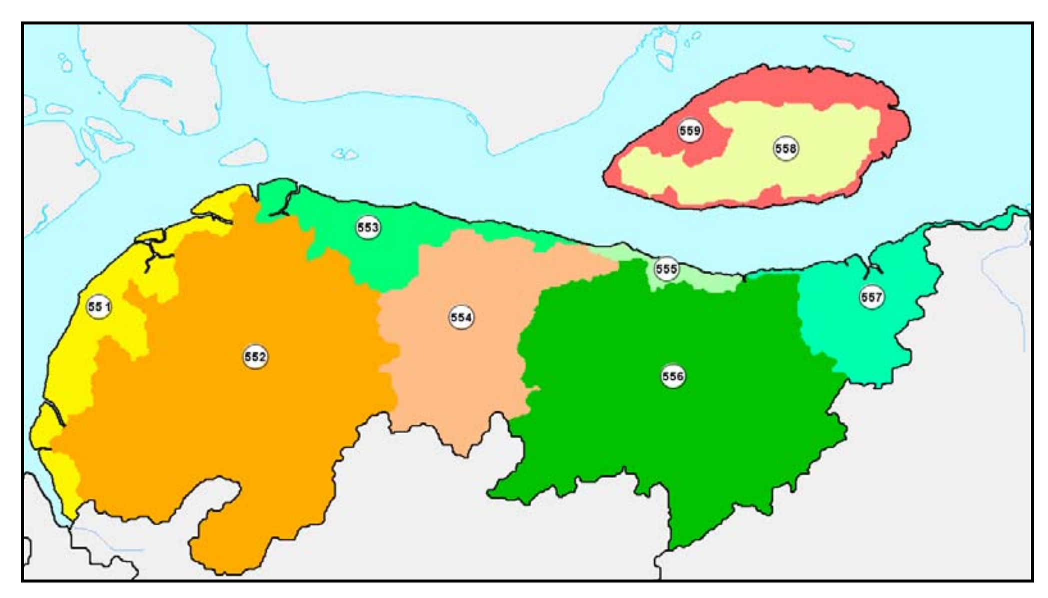


Figura N° 2.16. Unidad Hidrográfica 55. Obsérvese las unidades 558 y 559, obtenidas en territorio insular.

3. MÉTODO SEMIAUTOMÁTICO PARA DELIMITACIÓN DE CUENCAS

3.1 CONCEPTOS

Con la finalidad de que el método resulte mejor explicado más adelante se presentan aquí algunas definiciones de términos:

3.1.1 Modelo Digital del Terreno

Un Modelo Digital del Terreno (MDT), es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua, como puede ser la temperatura, la altitud o la presión atmosférica. En el caso que la variable a representar es la cota o altura del terreno se denomina Modelo Digital de Elevación. (MDE) (Ver Fig.2.17 y Fig.2.18)

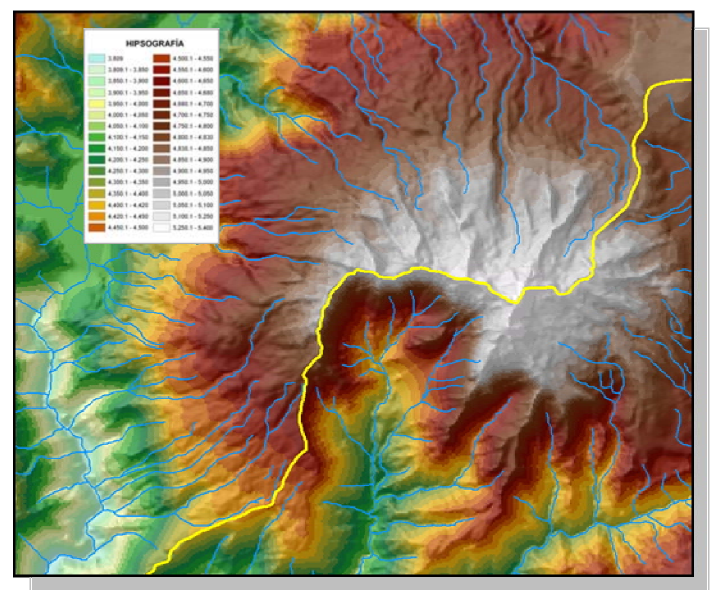


Figura N° 2.17

3.1.2 Modelo Digital de Elevación

El Modelo Digital de Elevación (MDE) es un Modelo Digital del Terreno cuyos datos almacenados representan valores de altitud.

En la actualidad es posible caracterizar la superficie y sobre todo, delimitar cuencas hidrográficas a partir de Modelos Digitales de Elevación (MDE).

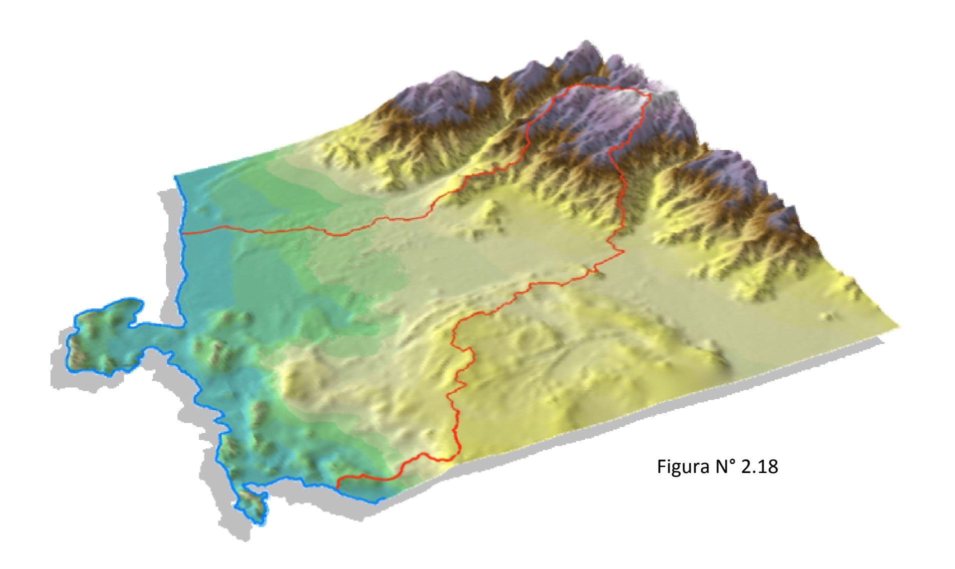


Figura N° 2.18

Estos modelos son simbólicos ya que establecen relaciones de correspondencia con el objeto real, mediante algoritmos matemáticos que son tratados mediante programas de Sistemas de Información Geográfica (Software SIG). Son estructuras de datos, no son sólo acumulaciones de cifras, sino que tienen una estructura interna con la cual deben interpretarse dichos datos.

3.1.3 Dirección de Flujo (Flow Direction)

La dirección del flujo está determinada por la dirección más empinada de descendencia de cada celda o pixel. Esta se calcula como:

Cambio de valor de z / distancia * 100

La distancia se calcula entre los centros de las celdas. Por lo tanto, si el tamaño de la celda es de 1, la distancia ortogonal entre dos celdas es 1, y la distancia diagonal es 1,414.

El valor de salida de la dirección del flujo es un número entero (1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128). Los valores para cada dirección del centro son los siguientes:

32	64	128
16		1
8	4	2

Por ejemplo, si la dirección de descenso más empinada está a la izquierda de la celda en proceso, su dirección del flujo sería codificada como 16.

Si la dirección de descenso a todas las celdas adyacentes tiene el mismo valor, la vecindad de ésta es ampliada hasta encontrar una empinada descendente mayor.

Si todas las celdas adyacentes son más altas que la celda en proceso, se considerará como ruido, y ésta será llenada con el valor más bajo de sus vecinos, y tendrá una dirección de flujo hacia esta celda. Sin embargo, si es una celda hundida cerca al borde físico de la matriz o que tenga al menos una celda adyacente sin datos (NODATA), entonces ésta no será llenada debido a la insuficiente información de la celda vecina. Para ser considerado como un verdadero sumidero de celdas, todas las celdas adyacentes deberán poseer información.

Este método, para la determinación de la dirección del flujo, se deriva de un modelo de elevación digital (DEM) que fue presentado por Jenson y Domingue (1988). (Ver fig. 2.19)

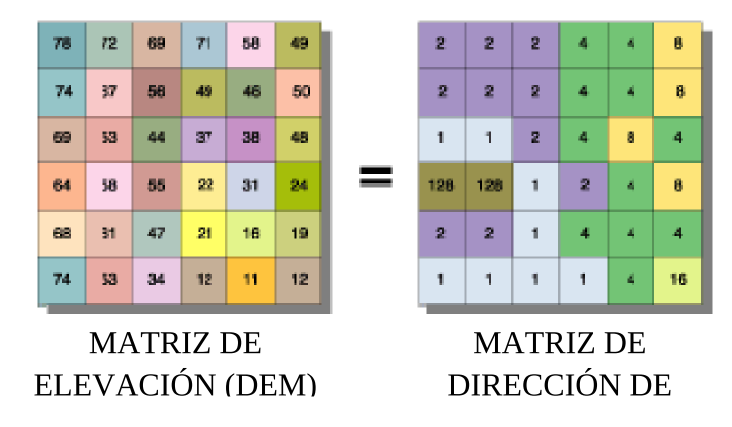


Figura N° 2.19

3.1.4 Acumulación de Flujo (Flow Accumulation)

El resultado de la acumulación de flujo es una matriz que lo representa, matriz en la cual se calcula para cada celda un valor de acumulación de peso proveniente de todas las celdas que fluyen hacia ella. (Ver fig. 2.20)

El flujo acumulado está en función del número de celdas que fluyen hacia cada una de las celdas de la matriz de salida. La celda que estás siendo procesada no se considera en tal acumulación.

Las celdas de salida con una alta acumulación de flujo identifican o representan la red de drenaje.

Las celdas de salida con una acumulación de flujo cero son puntos topográficos altos que permiten identificar las cordilleras.

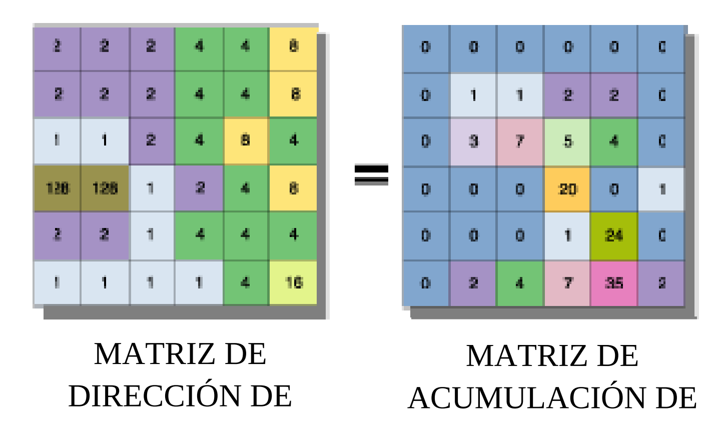


Figura N° 2.20

3.1.5 Stream Link

Asigna únicos valores a las secciones de una red de drenaje lineal matricial, comprendida entre intersecciones.

Los enlaces "Links" son las secciones de una red de drenaje que conectan dos confluencias (junctions) sucesivas, una confluencia y la desembocadura, o un inicio (naciente) y una confluencia. (Ver fig. 2.21)

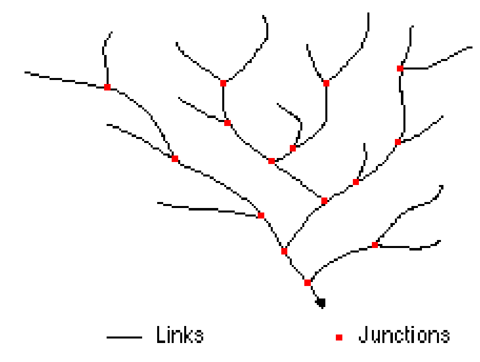


Figura N° 2.21

La matriz de la red de drenaje puede ser creada mediante el cálculo del umbral adecuado, el cual consiste en determinar el valor de la acumulación de flujo.

3.1.6 Watershed

Determina el área de contribución por encima de un conjunto de celdas en una matriz.

Un watershed es el área en el cual el agua que drena dentro de ella, se concentra en un colector común o principal. Otros términos utilizados para watershed son cuenca de captación o zona de contribución. Esta zona se define normalmente

como la superficie total que fluye a una determinada salida o “pour point”. El límite entre dos cuencas se conoce como frontera de drenaje o línea divisoria.

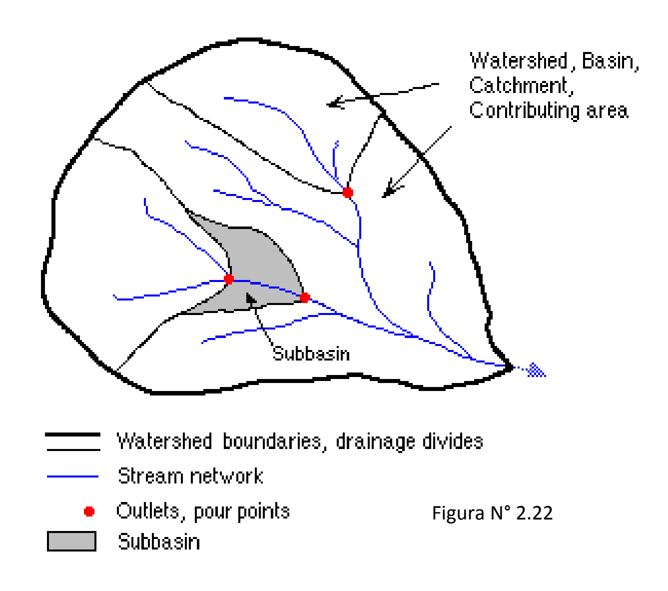


Figura N° 2.22

3.2 PROCESO DE DELIMITACIÓN Y CODIFICACIÓN

3.2.1 Delimitación de Unidades Hidrográficas

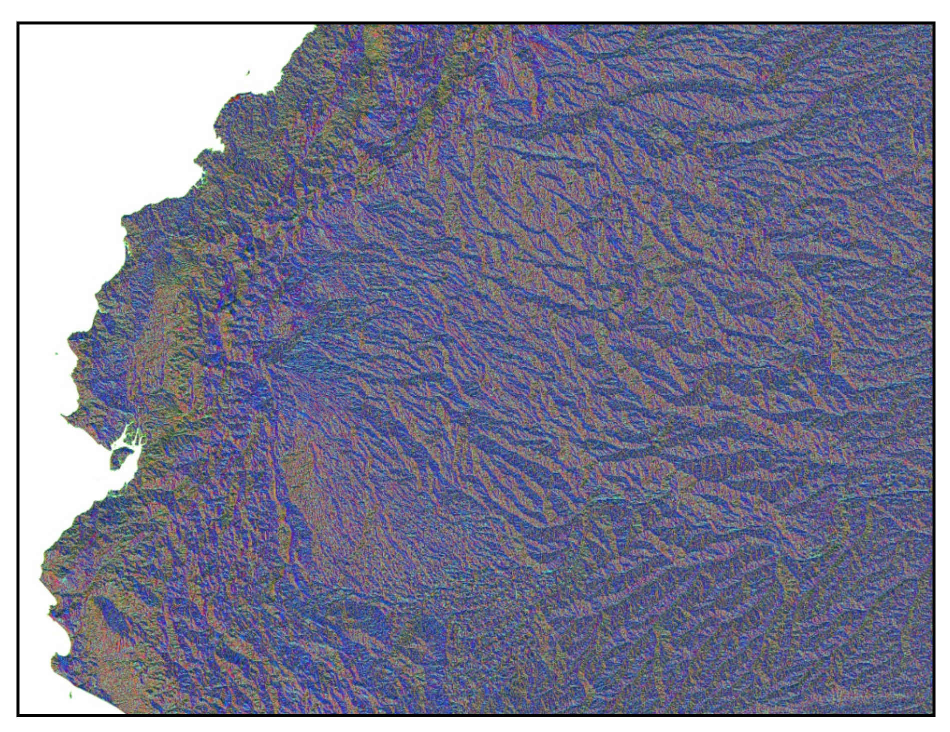
Existen maneras de delimitar o delinear cuencas hidrográficas, cada una de ellas se utiliza de acuerdo del carácter ulterior o propósito que se desee alcanzar. Maneras de delimitar que van desde las realizadas manualmente, sobre un plano topográfico o directamente en pantalla, hasta las que se realizan digitalmente de forma semiautomática, con las herramientas SIG y con la información base geo-espacial. Todas las formas de delimitar conducen al mismo objetivo, sin embargo, la diferencia radica en la precisión; y es allí donde el método que se utilice y la información base, determinarán la calidad del trabajo final.

En el presente trabajo ha considerado conveniente emplear como insumo la información raster de 15 segundos de arco de resolución espacial, en función de los objetivos finales del trabajo: Delimitación y Codificación de Unidades Hidrográficas de Sudamérica, a escala 1:1’000,000.

Los resultados del proyecto SRTM (Shuttle Radar Topography Mision) de la NASA, que constan de datos ráster de tipo topográfico con 90 metros de resolución espacial, se ha constituido en el MDT – Modelo Digital del Terreno – de uso más extendido en el mundo. Es precisamente esta información base, la que el proyecto HydroSHED utilizó para generar las capas de dirección y acumulación de flujo de Sudamérica, con 15 segundos de resolución espacial; la misma que se ha constituido en la información base del presente proyecto. (Ver figuras N° 3.2.1 y 3.2.2).

El proceso de delimitación de unidades hidrográficas (Figura N°3.2.3), se ha efectuado mediante dos subprocesos:

- Generación de áreas de drenaje (cuencas de captación) o watersheds
- Generación vectorial de unidades hidrográficas



· Figura N° 3.2.1: Información de Dirección de Flujo de una parte del territorio sudamericano. La Resolución espacial de la imagen es de 15" de arco

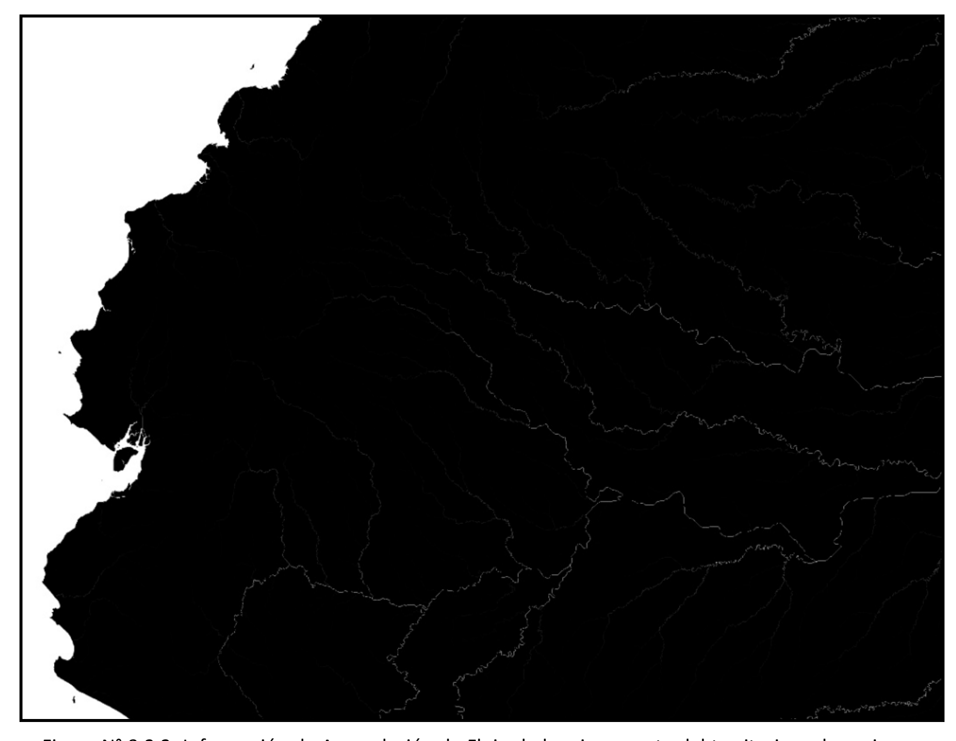


Figura N° 3.2.2: Información de Acumulación de Flujo de la misma parte del territorio sudamericano, mostrada tal como ArcGis lo presenta originalmente, bajo el tipo "Stretched" en escala de grises.

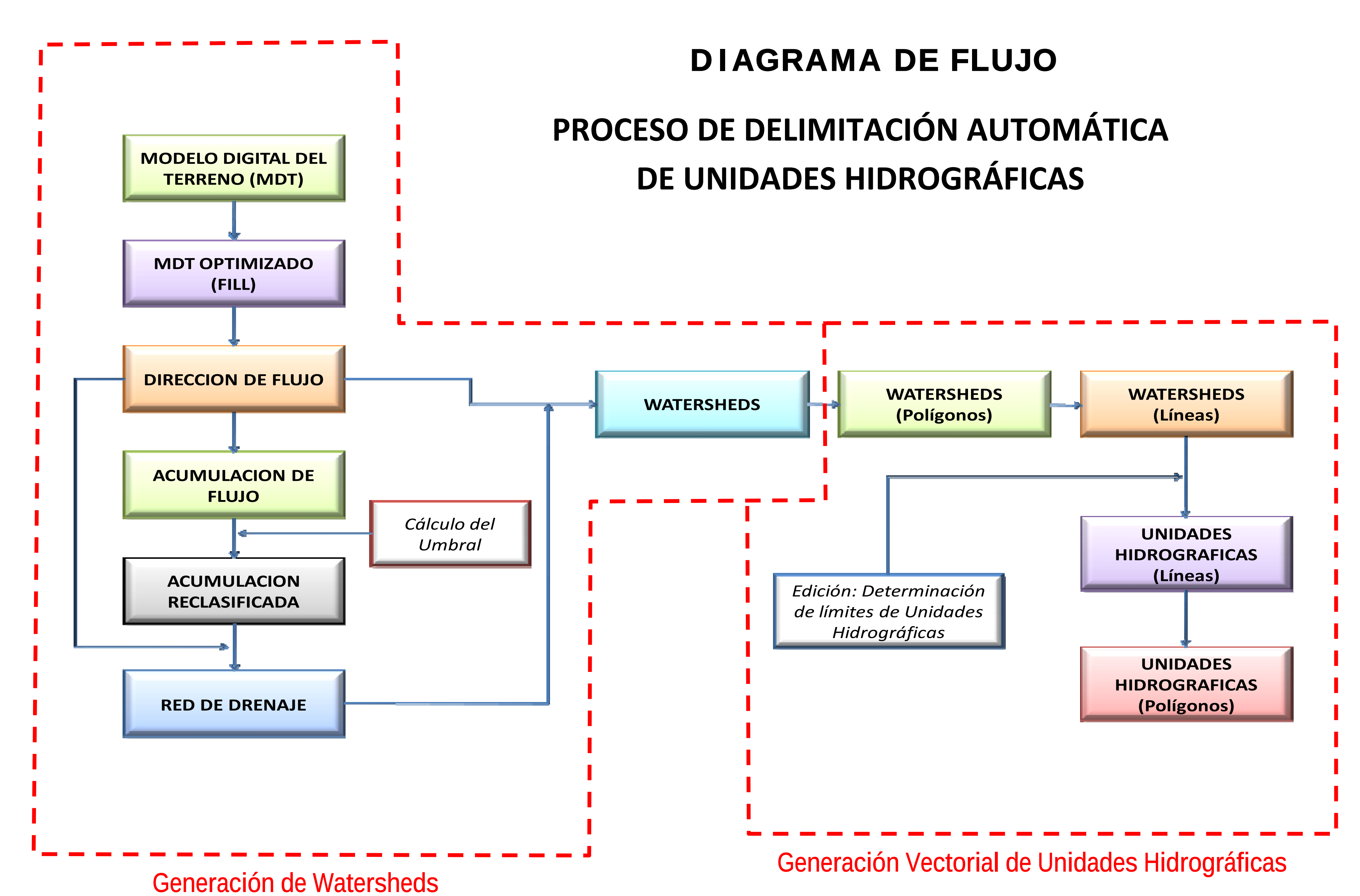

DIAGRAMA DE FLUJO
PROCESO DE DELIMITACIÓN AUTOMÁTICA
DE UNIDADES HIDROGRÁFICAS
MODELO DIGITAL DEL TERRENO (MDT)
MDT OPTIMIZADO (FILL)
DIRECCION DE FLUJO
ACUMULACION DE FLUJO
Cálculo del Umbral
ACUMULACION RECLASIFICADA
RED DE DRENAJE
WATERSHEDS
WATERSHEDS (Polígonos)
WATERSHEDS (Líneas)
UNIDADES HIDROGRAFICAS (Líneas)
Edición: Determinación de límites de Unidades Hidrográficas
UNIDADES HIDROGRAFICAS (Polígonos)
Generación de Watersheds
Generación Vectorial de Unidades Hidrográficas

Figura N° 3.2.3

1) Generación de áreas de drenaje (cuencas de captación) o Watersheds

Este proceso ha consistido en determinar las áreas de drenaje o watersheds con el criterio de delimitación del sistema Pfafstetter, basado en la información de dirección y acumulación de flujo de América del Sur.

El proceso descrito es conocido por los especialistas SIG y se emplea para generar unidades hidrográficas de diferente tamaño, y según en este caso la adaptación al método de codificación de los valores de la acumulación de flujo. En este caso se ha aplicado el método con algunas variantes debido al sistema de codificación elegido.

Para el presente trabajo se ha empleado la información del Proyecto HydroSHED, que está disponible en Internet; esta iformación, posee una resolución espacial de 15 segundos de arco – 460 metros aproximadamente.

La existencia de la información del proyecto Hydrosheds y su libre acceso ha ayudado de forma sustancial el desarrollo del presente trabajo y ha permitido el importante ahorro de tiempo, garantizando asimismo una buena calidad del producto.

Debido a la enorme extensión que cubre esta información (Sudamérica) y para mayor comodidad en el manejo de ésta, es necesario extraer, de ambos temas (dirección de flujo y acumulación de flujo), la región a trabajar.

a. Determinación del umbral de acumulación

Consiste en determinar el flujo de acumulación adecuado que permita a su vez obtener las unidades de drenaje (watersheds) según la metodología Pfafstetter: "cuatro unidades de drenaje tipo cuenca (cuencas cuyas áreas de drenaje sean las más grandes) y cinco unidades de drenaje de tipo inter-cuenca (que incluye a la unidad de drenaje de cabecera". Se debe indicar que las mayores áreas de drenaje corresponden a las unidades con las mayores acumulaciones de flujo. Por tanto las cuatro tributarios con las mayores acumulaciones de flujo de una cuenca, corresponden a las cuatro mayores áreas de drenaje.

Este es un procedimiento iterativo de ensayo y error; siendo la manera más sencilla de determinar el umbral de acumulación adecuado para obtener los tributarios necesarios. En este ensayo, se debe procurar que la acumulación de flujo elegida finalmente, sea lo suficientemente adecuada para visualizar el flujo principal y cuatro tributarios, sin importar que tan pequeños puedan ser éstos; basta tan sólo que aparezca un pixel como flujo tributario para ser considerado como tal.

En ArcGis, este procedimiento realiza en la ventana "*Layer Properties*", seleccionando (haciendo doble clic) el tema que posee la información de acumulación de flujo, de donde se elige la pestaña "*Symbology*" y de ésta, la presentación "*Clasified*", para realizar una clasificación en dos rangos (Figuras N° 3.2.4 y 3.2.5). El primer rango va de 1 a un numero "N" (valor calculado por el sistema, de acuerdo al método de clasificación empleado, por defecto es "Natural Breaks" - Jenks) y el segundo, del número "N" al número máximo que alcanza la acumulación de flujo.

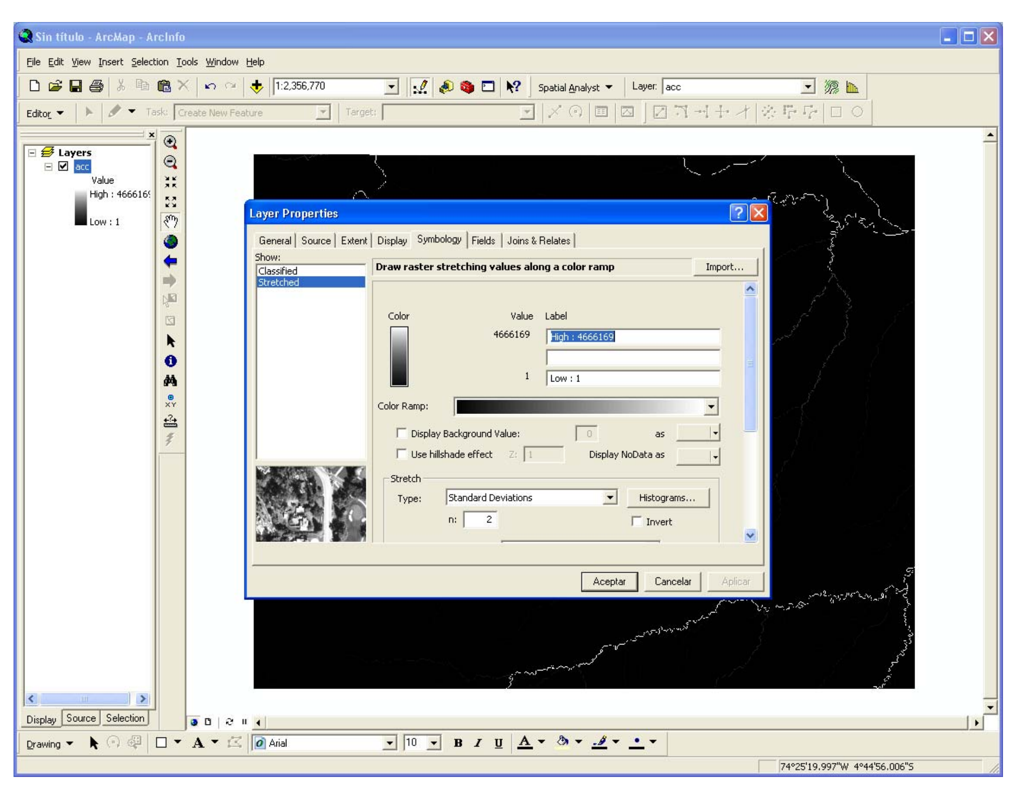


Figura N° 3.2.4: Información de Acumulación de Flujo de la misma parte del territorio sudamericano, mostrada tal como ArcGis lo presenta originalmente, bajo el tipo "Stretched" en escala de grises.

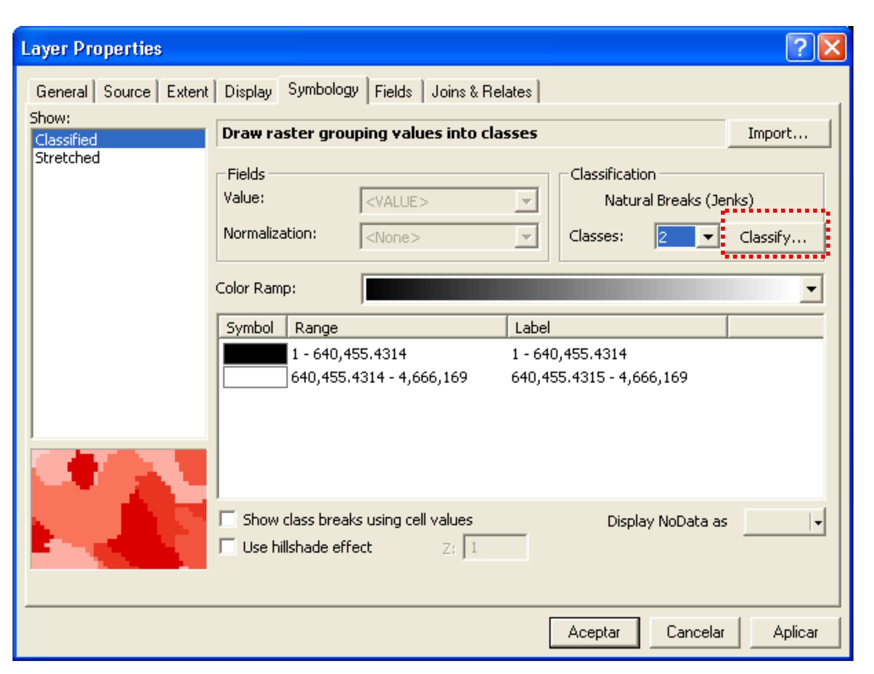


Figura Nº 3.2.5: En la opción de presentación "Classified", determinar dos rangos de clasificación, tal como muestra la figura. Luego elegir la opción "Classify…" para efectuar las pruebas necesarias en busca del umbral de acumulación adecuado en escala de grises.

El número “N” es con el que se debe realizar los ensayos. Este proceso se realiza con la opción “*Classify…*” (Figura N° 3.2.5) y modificando el primer “*Break Value*” y aceptando los cambios cada vez, con el botón “*OK*” (Figura N° 3.2.6). Para poder visualizar los cambios en la vista, al primer rango, (que es el que no debería aparecer), se le asignará el color “invisible” – sin color; y al segundo, se le asignará un color cualquiera, que por convención puede ser el color azul (Figura N° 3.2.7 y 3.2.8)

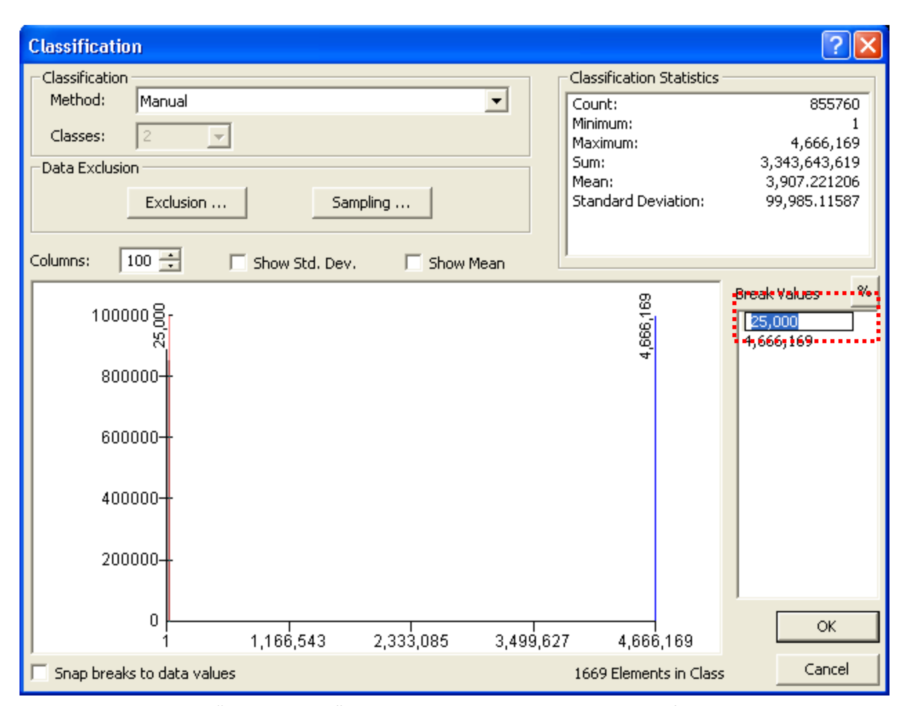


Figura N° 3.2.6: En “Break Values”, el primer valor es con el que realizará las pruebas. En cada ensayo realizado, aceptar con “OK”.

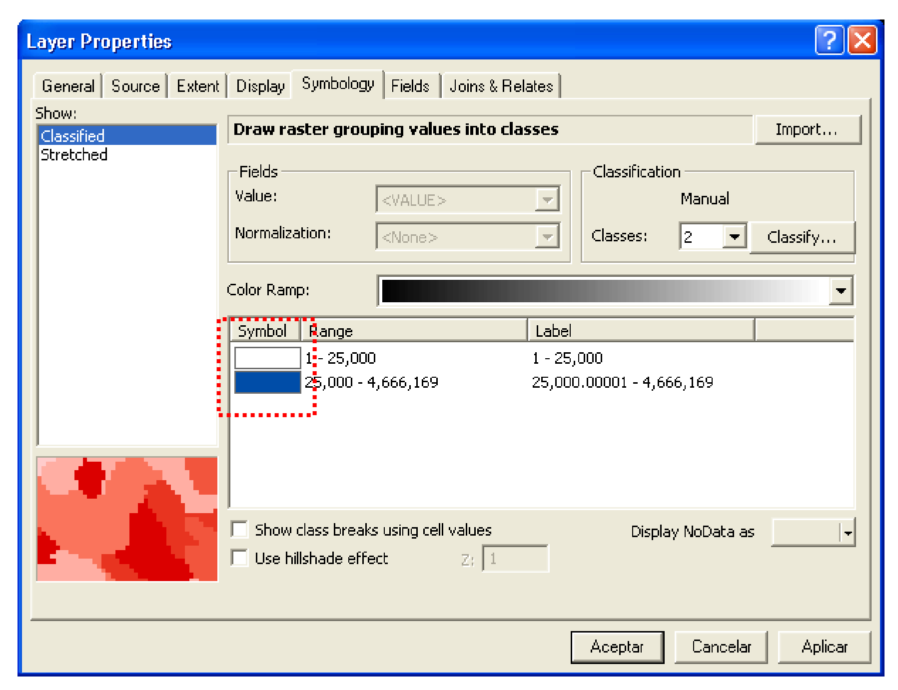


Figura N° 3.2.7: Al primer rango se le aplicará un color “invisible”, y al segundo se le asignará un color cualquiera.

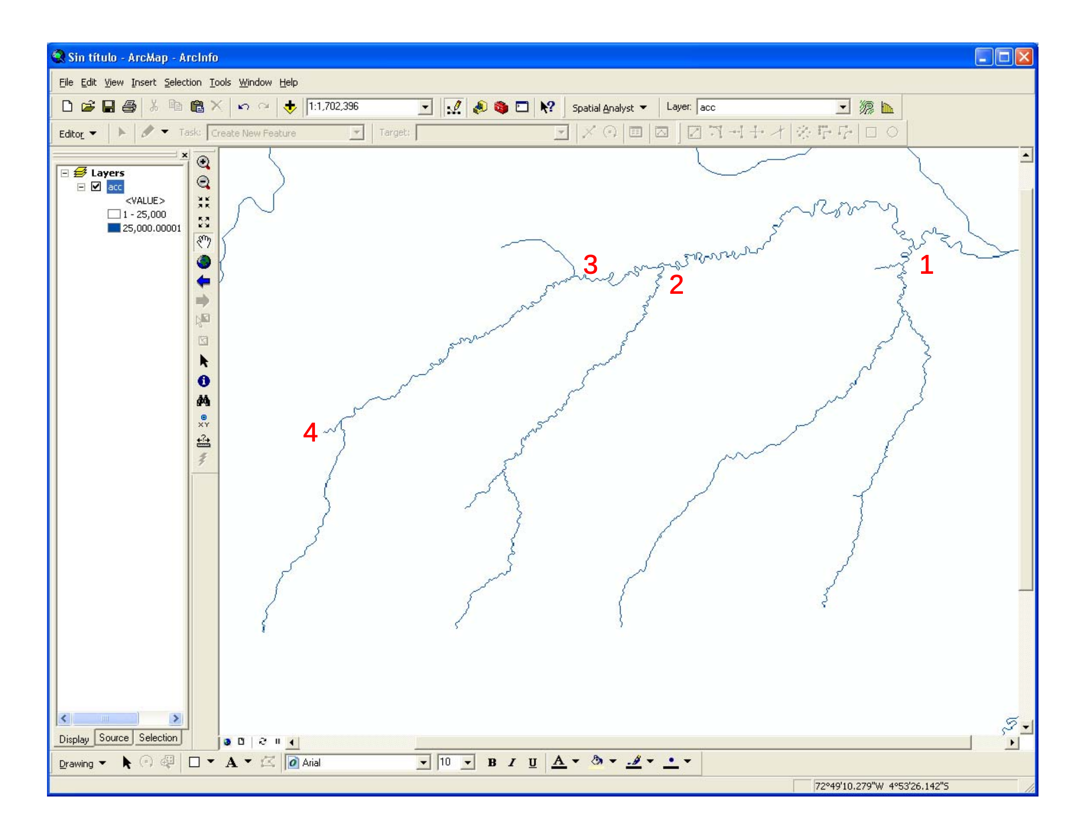


Figura N° 3.2.8: Al primer rango se le aplicará un color "invisible", y al segundo se le asignará un color cualquiera.

Una vez obtenida la clasificación adecuada, que posibilite la determinación de los cuatro tributarios más importantes, se continúa con el siguiente subproceso.

b. Obtención de un tema de reclasificación

Una vez obtenido el umbral de acumulación, es necesario salvar estos rangos en un nuevo tema temporal, con el propósito de capturar los valores relevantes en una nueva clase.

En ArcGis, este proceso se realiza eligiendo la opción "*Reclassify*" del menú correspondiente a la extensión "*Spatial Analyst*". En "*Input Raster*" se elige el tema en el cual se realizó el cálculo del umbral de acumulación y en la columna "*New Values*", se debe colocar "0" al primer rango y "1" al segundo. Luego se debe presionar "*OK*" para aceptar los cambios y crear el nuevo tema. (Figura Nº 3.2.9)

Este tema, cuyo nombre inicia con las palabras "*Reclass of….*", presenta dos categorías, "0" y "1; la primera categoría corresponde al valor irrelevante, por lo tanto ignorado, y la segunda, es la categoría de interés, ya que agrupa los cursos de agua, obtenidos del umbral de acumulación, cuyas unidades de drenaje o cuencas serán generadas. (Figura Nº 3.3)

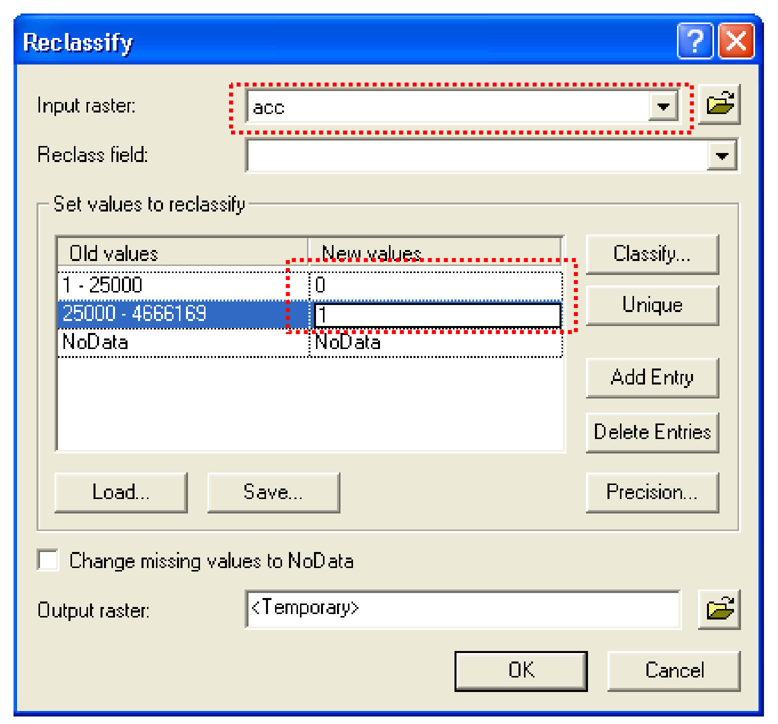


Figura N° 3.2.9: Eligiendo el tema, en el cual se realizaron las pruebas de busca del valor del umbral de acumulación, se ingresan nuevos valores para cada rango: "0" y "1", según muestra la figura. Aceptar con "OK" para crear el nuevo tema.

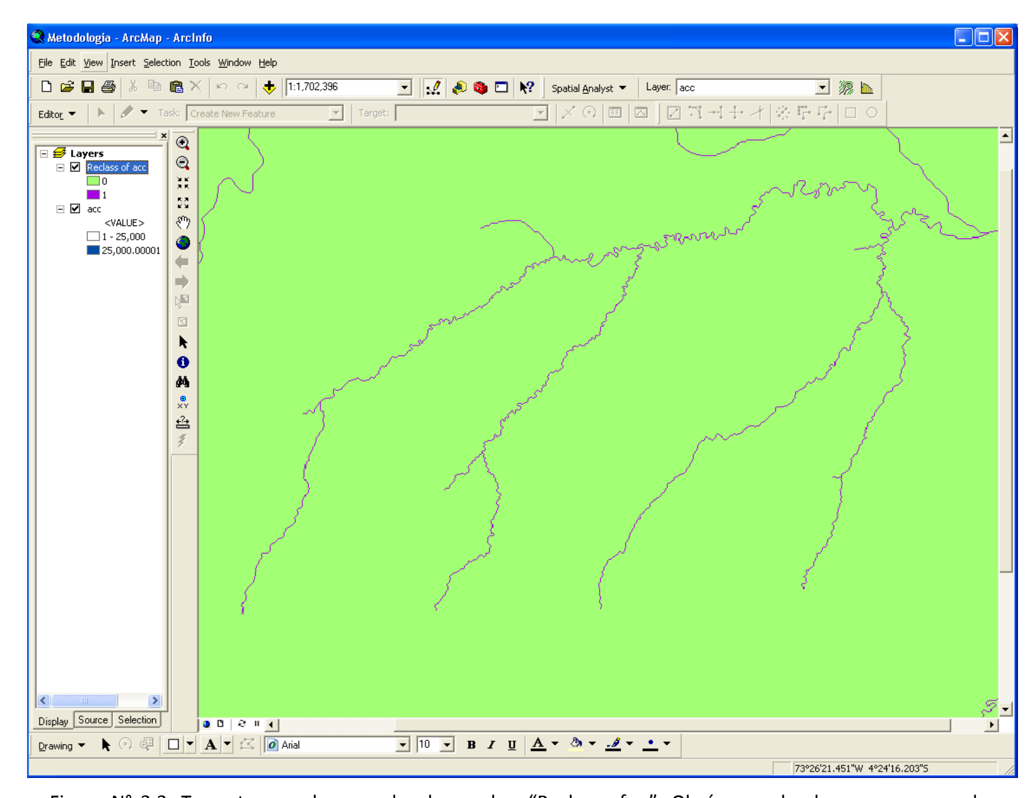


Figura N° 3.3: Tema temporal generado, de nombre "Reclass of …". Obsérvese el color que posee cada rango y sus correspondientes en la vista. El color fucsia representa al valor "1", conformado por los cursos de agua determinados por el umbral de acumulación

c. Generación de la red de drenaje relevante

Este procedimiento se realiza para obtener un nuevo tema que presente solamente los cursos de agua, correspondiente a la categoría "1" del tema producto de la reclasificación. Este nuevo tema es importante pues a partir de la red de drenaje que en ella se determine, se generarán las respectivas unidades de drenaje, cuencas o watersheds.

El proceso en ArcGis, consiste en crear un tema de tipo "*Stream Link*", cuya ventana se ubica en "*ArcToolbox*", en las herramientas de "*Spatial Analyst*", dentro de la categoría "*Hidrology*". En la opción "Input stream raster", de esta ventana, se ingresa el nombre del tema reclasificación, creado en el paso anterior; en la siguiente, en la opción "Input flow direction raster", se indica el nombre del tema que contiene la información de la dirección de flujo; y finalmente, en la opción "Ouput raster", se ingresa el nombre del tema de salida. (Figura N° 3.3.1).

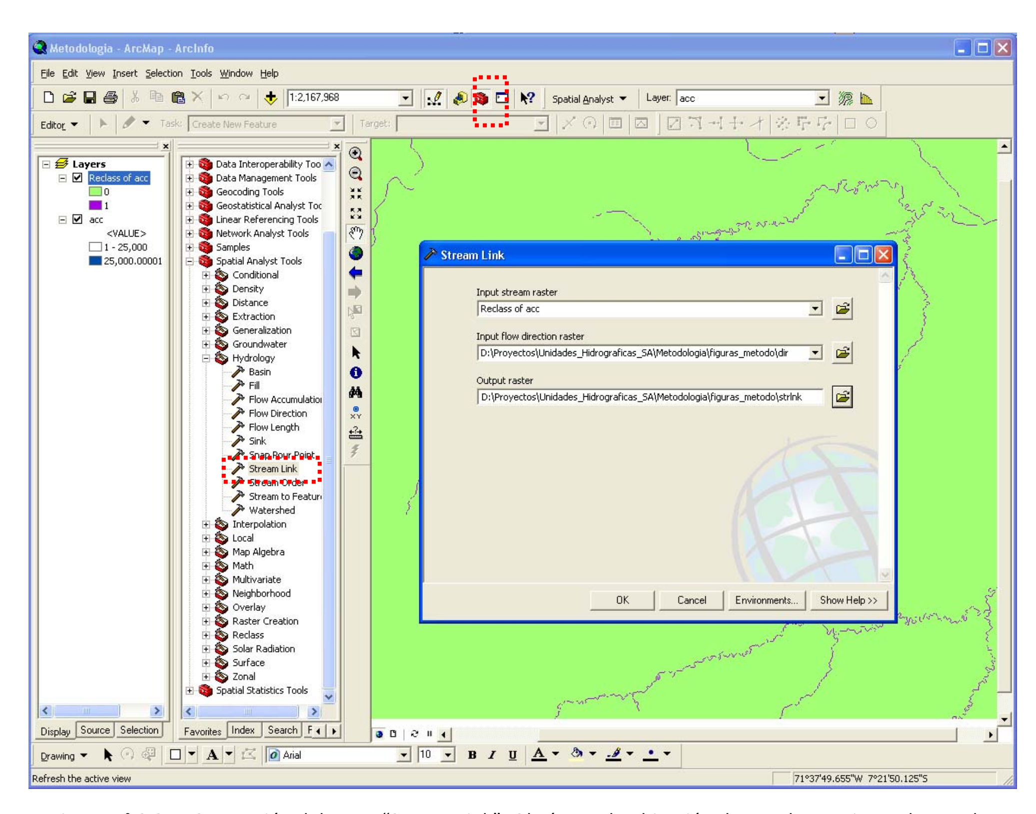


Figura N° 3.3.1: Generación del tema "Stream Link". Obsérvese la ubicación de esta herramienta dentro de "ArcToolbox" y su ventana de creación, la cual requiere los temas de la reclasificación y de la dirección de flujo.

El tema obtenido contiene solamente la información de la categoría "1", comprendido por los cursos de agua obtenidos de la determinación del umbral de acumulación. (Figura N° 3.3.2)

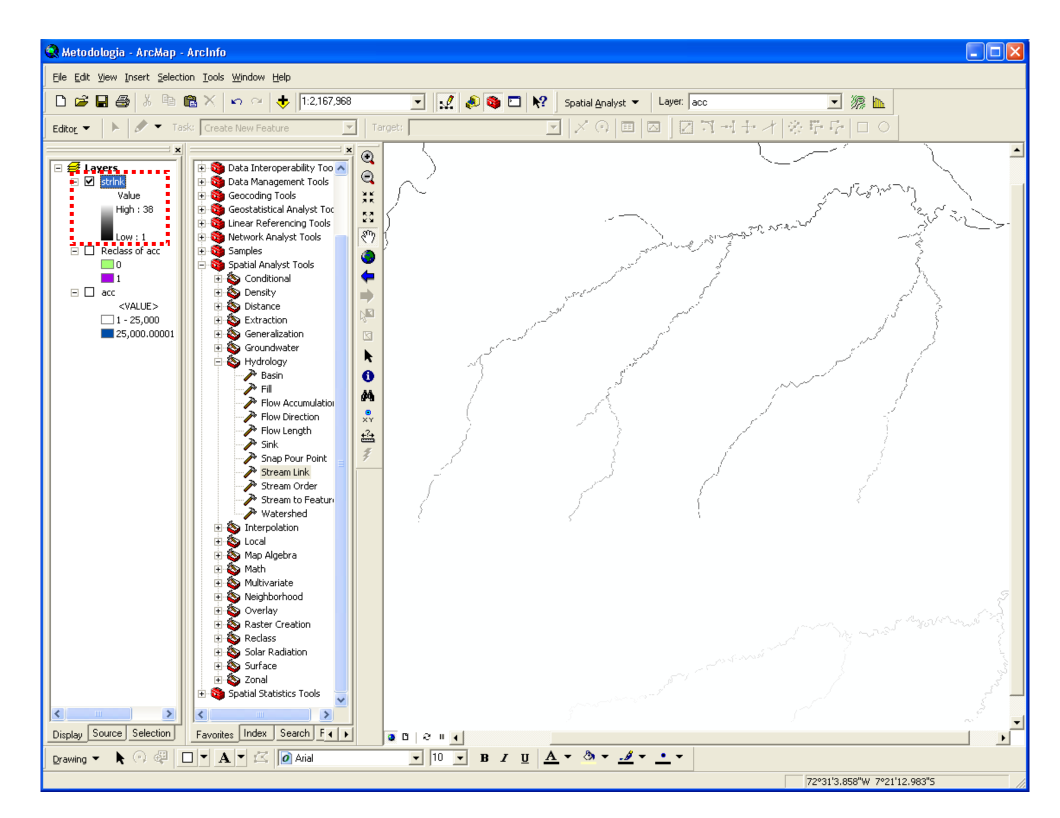


Figura N° 3.3.2: Tema "Stream Link" generado.

d. Generación de Watersheds

Para la generación automática de watersheds – cuencas hidrográficas -, se requiere principalmente de la dirección de flujo y el enlace de cursos o "stream link".

Ciertamente, no es el único método de generación de unidades de drenaje o watersheds, ya que existen otras técnicas que emplean datos de tipo puntual como los puntos de desembocadura o "pour points", que se emplea para generar de forma controlada por el usuario la unidades de drenaje o watersheds.

En ArcGis, este proceso se realiza con la utilidad "*Watershed*" del "*ArcToolbox*", en el ítem "*Hidrology*" de "*Spatyal Analyst*" (Figura Nº 3.3.3). Esta herramienta solicita como información de entrada: la dirección de flujo y los cursos de agua - "stream link", generados en los pasos anteriores. En la opción "*Input flow direction raster*" se ingresa el nombre del tema que contiene la información de la dirección de flujo; dejando el nombre del tema "stream link", para la opción: "*Input raster or feature pour point data*". Finalmente, se indica el nombre de un tema de salida, que contendrá las unidades de drenaje o watersheds requeridos. (Figura Nº 3.3.4)

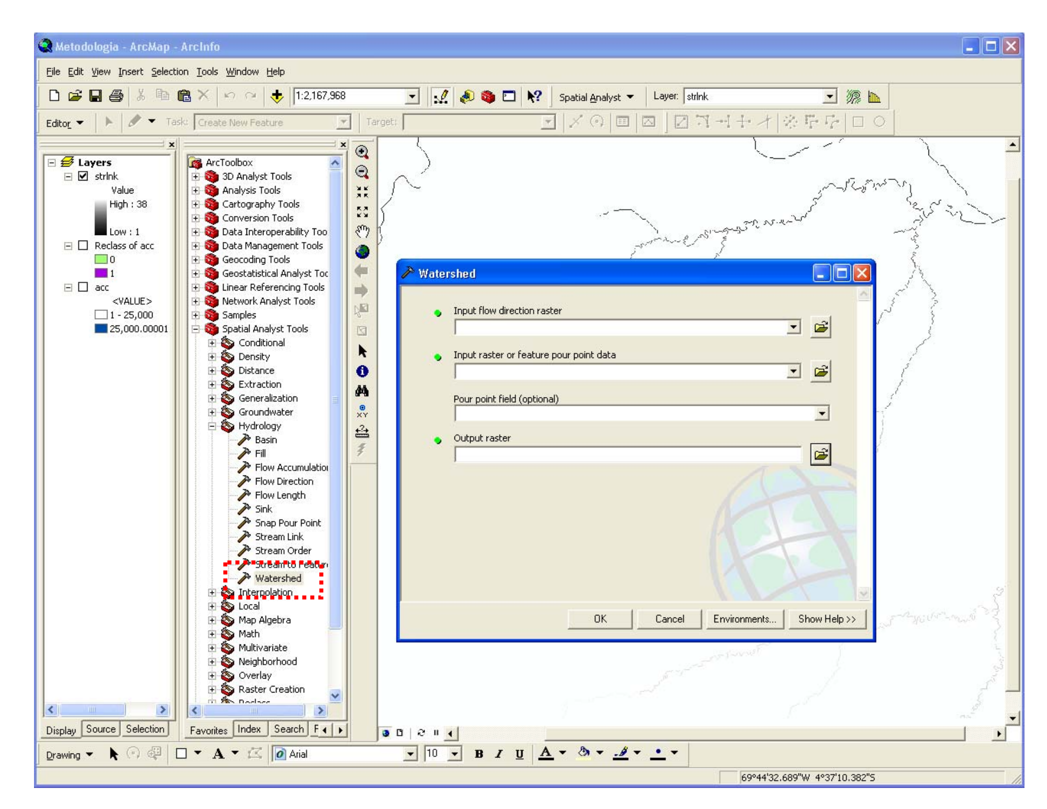


Figura N° 3.3.3: Obsérvese la ubicación de la herramienta “Watershed” y su correspondiente interface de ingreso.

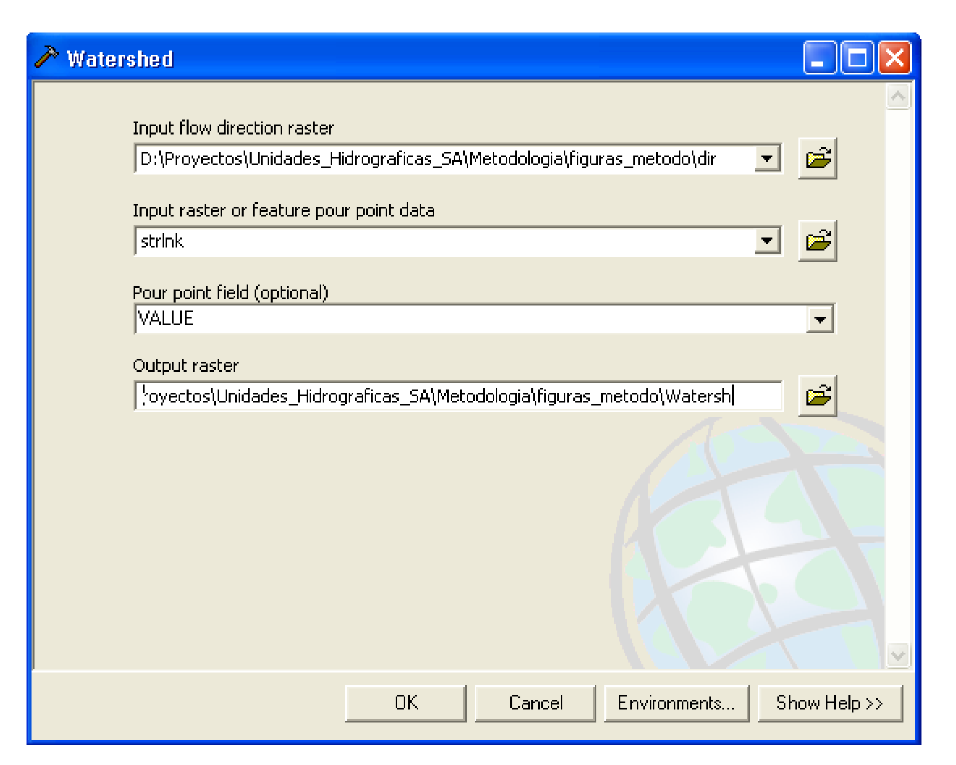


Figura N° 3.3.4: Interface de ingreso de la herramienta “Watershed”.

El producto obtenido es un raster, en donde las cuencas son presentadas por agrupaciones de pixeles de igual valor; esto puede hacerse evidente asignando colores diferentes a las cuencas, a través de la ventana “Layer

Propperties" del tema, cambiando el modo de presentación a "*Unique Values*". (Figuras Nº 3.2.4 y 3.3.5)

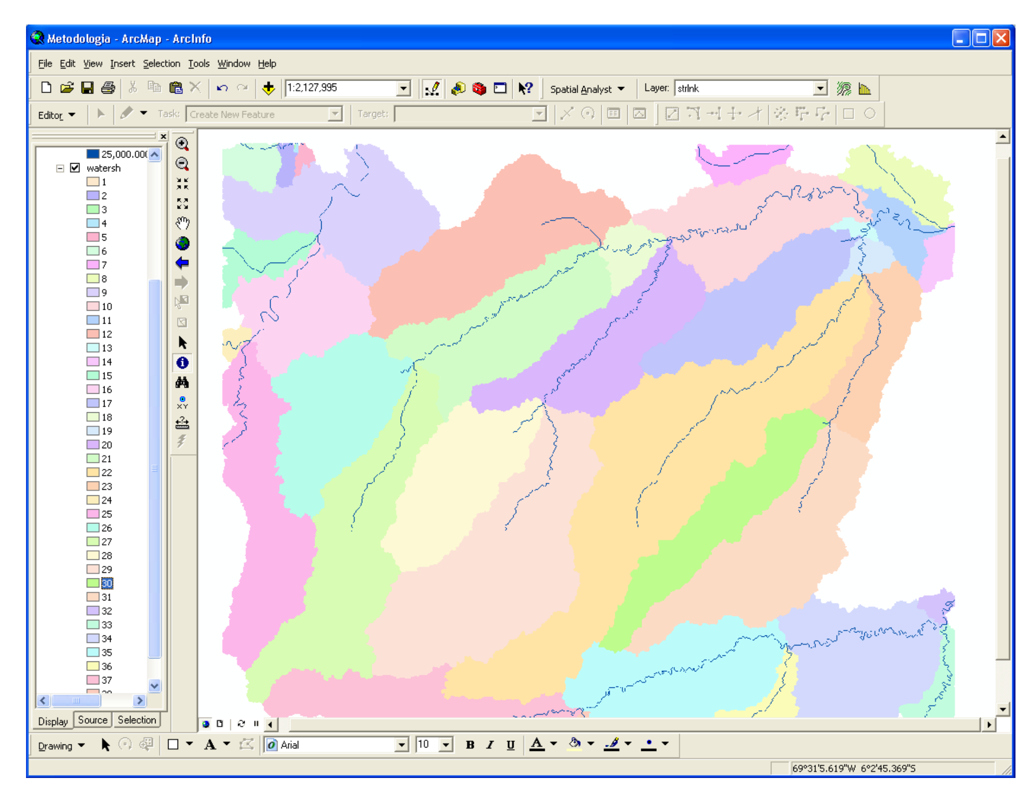


Figura N° 3.3.5: Watersheds generados y diferenciados por colores.

2) Generación Vectorial de Unidades Hidrográficas

Este proceso consiste en convertir las unidades hidrográficas o watersheds obtenidos, al formato vectorial de tipo polígono. En algunos casos este proceso podría ser simple o directo, sin embargo, de acuerdo a la complejidad y cantidad de cuencas que se desee delimitar a la vez, podría ser necesario realizar una conversión al formato lineal, es decir, pasar de polígonos a líneas, con las cuales la edición suele ser mucha más sencilla y rápida. Luego de la edición lineal, se procederá a la reconversión al tipo polígono, quedando de esta forma listo para el proceso de llenado de la tabla de atributos con los códigos respectivos.

a. Conversión de raster a polígono

En Arcgis, este procedimiento se efectúa con la herramienta "*Raster to features…*", de la opción "*Convert*", del menú perteneciente al módulo "*Spatial Analyst*". En la primera opción de esta ventana (Figura Nº 3.3.6), se elige el tema raster a convertir, en este caso, la que contiene los watersheds. Las opciones "*Field*" y "*Output geometry type*" deben quedar con los valores "*Value*" y "*polygon*", respectivamente. A criterio del usuario activar o desactivar la opción "*Generalize lines*" (Generalización de

líneas) y por último, se debe asignar un nombre de salida para el nuevo tema vectorial. En la figura N° 3.3.7, se muestra el tema vectorial sobre la información raster de watersheds, en los que se ha eliminado los elementos innecesarios (líneas no útiles para la conformación de los watersheds requeridos) e integrado convenientemente.

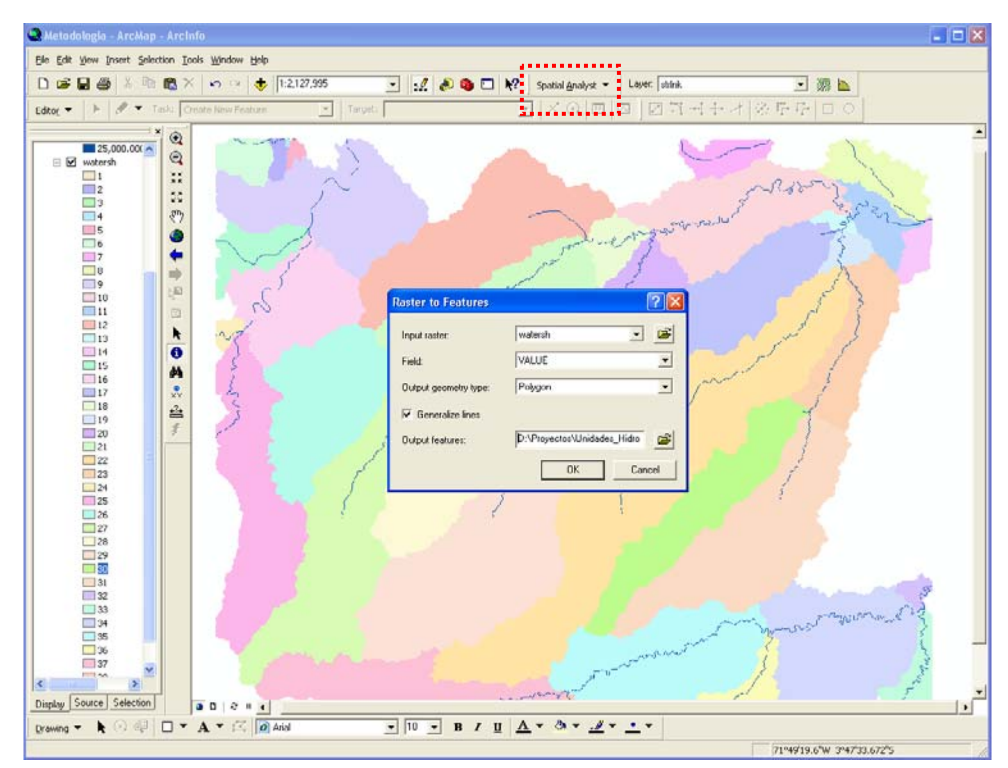


Figura N° 3.3.6: Obsérvese el módulo "Spatial Analyst" y la interface de ingreso de la herramienta "Raster to Features" para cada uno.

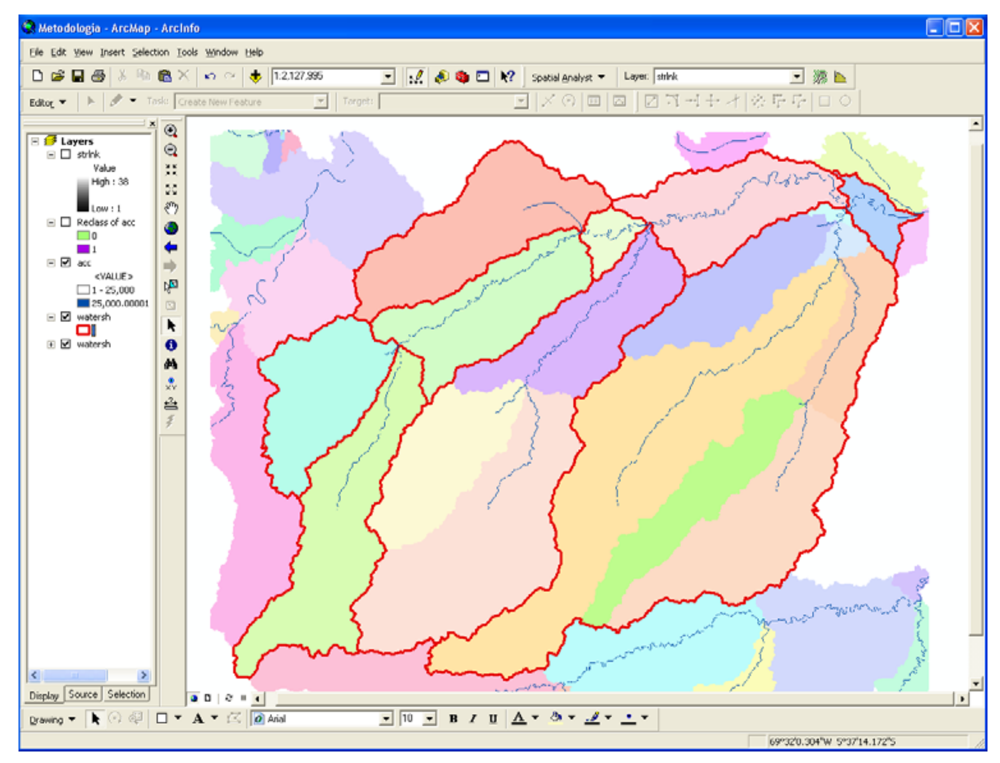


Figura N° 3.3.7: Información vectorial de polígonos (líneas rojas) sobre los watersheds raster. Nótese que se han eliminado y fusionado convenientemente algunos polígonos para obtener las nueve unidades requeridas.

La opción "*Generalize lines*", en estado activo (checked), realiza la generalización de los contornos poligonales, evitando que estos bordes lineales presenten segmentos "aserrados" debido a la forma de los pixeles (uncheked). Lo que realiza "*Generalize lines*", es aumentar el tamaño de los segmentos que conforman los arcos y en consecuencia, disminuir el número de vértices.

b. Conversión de polígonos a líneas:

En caso de ser necesario, debido a modificaciones que se requieran realizar en la delimitación de las unidades hidrográficas, es recomendable que se adicione este proceso al trabajo de edición, ya que el trabajo en líneas es mucho más versátil y rápido por el gran número de herramientas que existen para ello.

El proceso en ArcGis, es mediante la herramienta "*Polygon to Line*" de la categoría "*Features*" de la sección "*Data Management Tools*" de "*ArcToolbox*". (Figura N° 3.3.8)

c. Reconversión de líneas a polígonos

Con el tema de líneas concluido, se procede a generar los polígonos correspondientes.

La ubicación de esta herramienta, en ArcGis, es similar a la anterior. Se encuentra en "*ArcToolbox*", en la sección "*Data Management Tools*", en la categoría "*Features*" con el nombre: "*Features to Polygon*". (Figura N° 3.3.8)

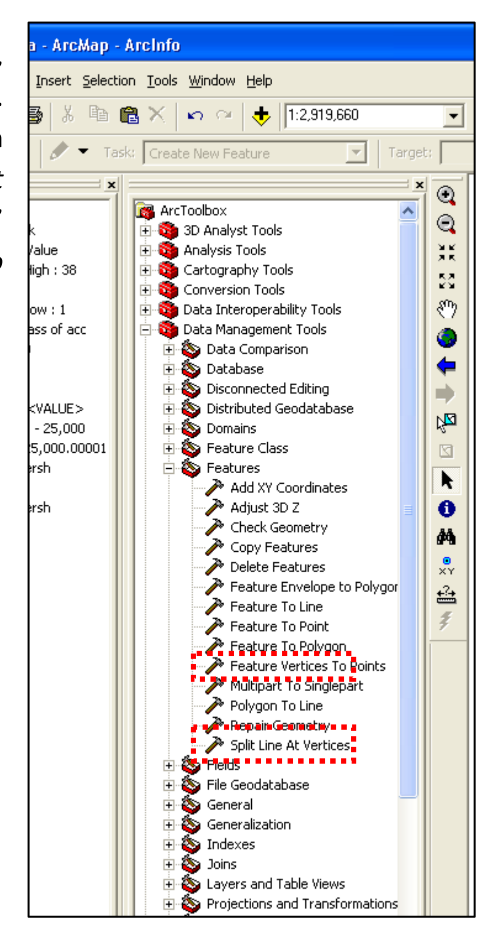


Figura N° 3.3.8: Localización de las herramientas "Features to Polygon" y "Polygon to Line".

3.2.2 Codificación de Unidades Hidrográficas

La codificación de unidades hidrográficas sigue los fundamentos de la Metodología Pfafstetter, que se ha expuesto en el Capítulo II.

Una vez conformado el tema de polígonos, que representan las unidades hidrográficas, se realiza el proceso de codificación en su respectiva tabla de atributos. Esta tabla debe presentar una estructura pre-establecida, que puede ser única o de tipo relacional. En el primer caso, en la tabla única, todos los campos son creados en la misma tabla, en la cual la reiteración de datos es común; en el segundo caso, las tablas relacionales son estructuradas de tal manera de que no existe redundancia de datos, expresadas en un conjunto de tablas relacionadas por campos en común.

El ingreso de información tabular es un proceso muy sencillo en SIG. A medida que se va seleccionando cada polígono del tema, se ingresarán los datos correspondientes a ese elemento, en el registro respectivo de la tabla de atributos.

La información contenida tabularmente, deberá contar principalmente de campos para almacenar los códigos Pfafstetter de las unidades hidrográficas en los diferentes niveles, así como el nombre y área o superficie de las mismas.

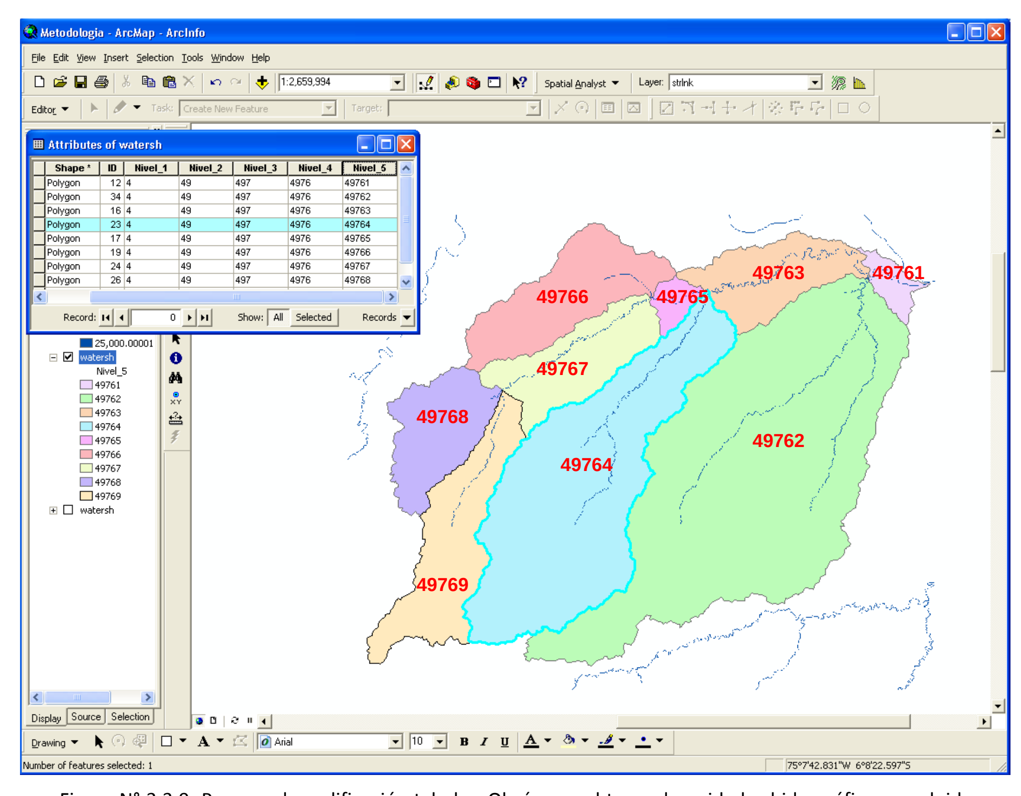


Figura N° 3.3.9: Proceso de codificación tabular. Obsérvese el tema de unidades hidrográficas concluido con la información de su tabla de atributos completa.

4. UNIDADES HIDROGRÁFICAS DE SUDAMÉRICA

Como resultado del Proyecto de Delimitación y Codificación de Unidades Hidrográficas de Sudamérica – Nivel 3, se han obtenido 801 unidades hidrográficas, cuya distribución por regiones hidrográficas y por niveles, es como sigue:

UNIDAD	NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3
Región Hidrográfica 0	1	9	63
Región Hidrográfica 1	1	10	91
Región Hidrográfica 2 - Cuenca Orinoco	1	9	81
Región Hidrográfica 3	1	9	81
Región Hidrográfica 4 - Cuenca Amazonas	1	9	65
Región Hidrográfica 5	1	9	81
Región Hidrográfica 6 - Cuenca Tocantins	1	9	81
Región Hidrográfica 7	1	9	81
Región Hidrográfica 8 - Cuenca Paraná	1	10	83
Región Hidrográfica 9	1	10	94
TOTAL	**10**	**93**	**801**

En las figuras siguientes (3.3.10, 3.3.11 y 3.3.12), se muestran las unidades hidrográficas obtenidas como resultado del proyecto, en los niveles 1, 2 y 3, respectivamente.

El área o superficie obtenida para Sudamérica es de 17.737.674,12 Km², correspondiendo para la parte continental 17.561.588,95 Km² y para la insular 176.085.17 Km².

Para el nivel 1, el área determinada para cada una de las unidades han sido las siguientes:

Código	Nombre	Área (Km²)
0	Región Hidrográfica 0	583.404,55
1	Región Hidrográfica 1	1.232.100,04
2	Región Hidrográfica Orinoco	934.339,31
3	Región Hidrográfica 3	589.484,10
4	Región Hidrográfica Amazonas	5.892.235,65
5	Región Hidrográfica 5	110.352,54
6	Región Hidrográfica Tocantins	769.445,28
7	Región Hidrográfica 7	281.0797,57
8	Región Hidrográfica Paraná	2.588.980,33
9	Región Hidrográfica 9	2.226.534,75
TOTAL		**17.737.674,12**

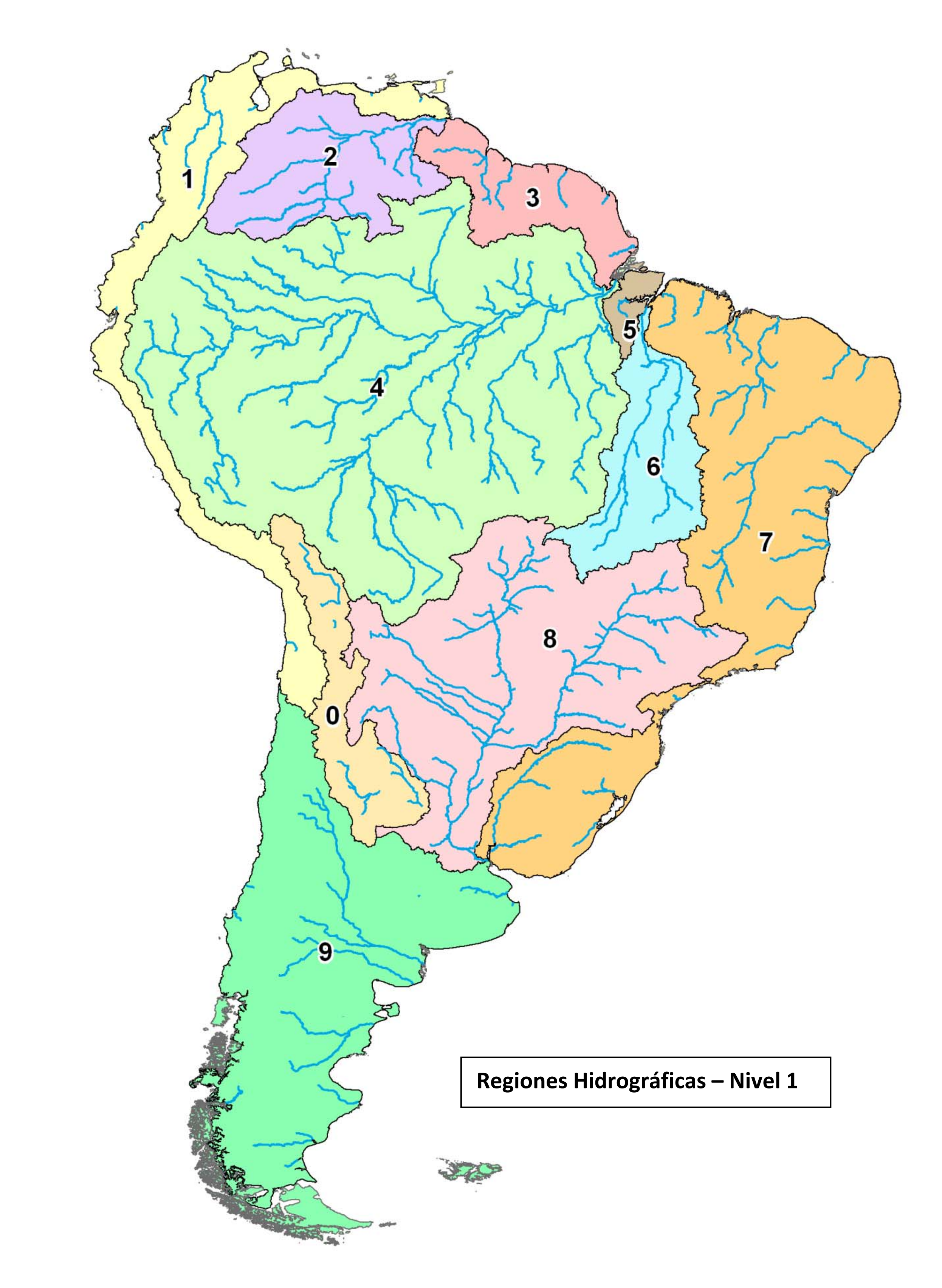


Figura N° 3.3.10: Regiones Hidrográficas de Nivel 1 - Sudamérica.

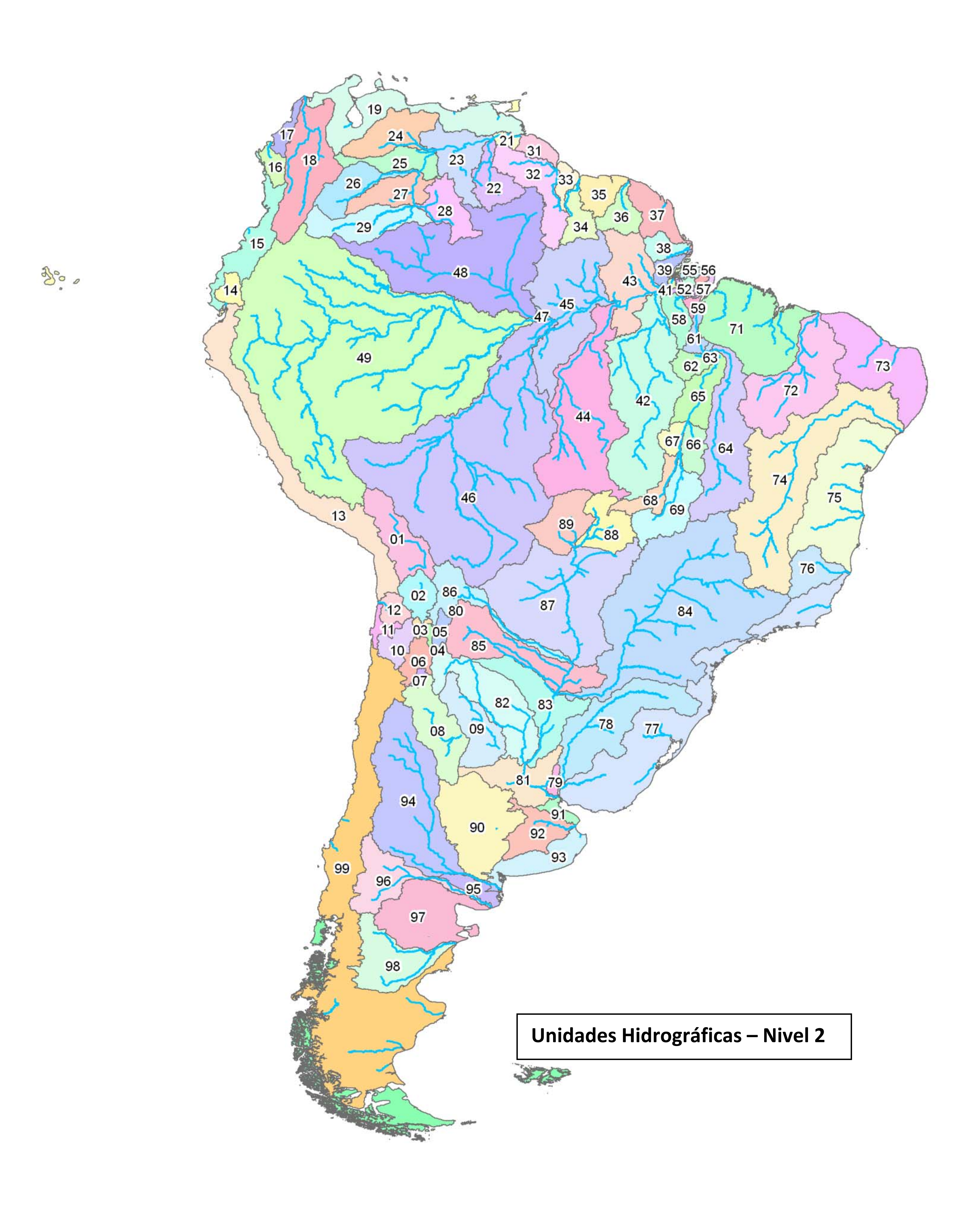


Figura N° 3.3.11: Unidades Hidrográficas de Nivel 2 - Sudamérica.



Figura N° 3.3.12: Unidades Hidrográficas de Nivel 3 - Sudamérica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Environmental System Research Institute (ESRI). ArcGis Desktop Help 9.2. Marzo 2007. http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=welcome

- Ruiz, Rosa; Torres, Humberto y Aguirre, Mario. Memoria Descriptiva de la Delimitación y Codificación de Unidades Hidrográficas del Perú. INRENA. Lima. 2006.

- Furnans, Jordan, Olivera, Francisco, and Maidment, David. *Area-to-Area Navigation and the Pfafstetter System*. MSE Thesis, Department of Civil Engineering, The University of Texas at Austin.(Diciembre,2001).
  http://www.crwr.utexas.edu/online.shtml

- HYDRO1K data, descriptions available from the internet as of 6/14/01: http://edcdaac.usgs.gov/gtopo30/hydro/

- Verdin, Kristine L. 1997. “A System for Topologically Coding Global Drainage Basins and Stream Networks”. 1997 ESRI International GIS User Conference Proceedings: (6/14/01) http://gis.esri.com/library/userconf/proc97/proc97/to350/pap311/p311.htm

- Silva, Paulo Afonso. Classificaçao e Codificaçao das Bacias Hidrográficas Brasileiras segundo o Método Pfafstetter, com uso de Geoprocessamento. II Encuentro de las Aguas – Foro Interamericano de Gestión de Recursos Hídricos, organizado por IICA Uruguay. Montevideo. 1999.